

UniRV- UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO
AGRÍCOLA NO CERRADO

SILVIO VASCONCELOS DE PAIVA FILHO
Magister Scientiae

RIO VERDE
GOIÁS – BRASIL
2022

SILVIO VASCONCELOS DE PAIVA FILHO

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO
CERRADO**

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de Rio Verde, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para à obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**RIO VERDE
GOIÁS - BRASIL**

2022

Universidade de Rio Verde
Biblioteca Luiza Carlinda de Oliveira
Bibliotecário: Juatan Tiago da Silva – CRB 1/3158
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – (CIP)

P168q Paiva Filho, Silvio Vasconcelos

Qualidade física do solo em sistemas de produção agrícola no cerrado. /
Silvio Vasconcelos de Paiva Filho. – 2022.
58 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Luiza Moraes Tavares.
Coorientadora: Profa. Dra. Camila Jorge Bernabé Ferreira

Dissertação (Mestrado) — Universidade de Rio Verde - UniRV, Faculdade
de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, 2022.

1. Integração lavoura pecuária. 2. plantio direto. 3. *Urochloa*. I. Tavares,
Rose Luiza Moraes. II. Título.

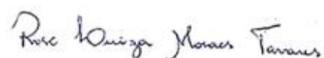
CDD: 631.43

SILVIO VASCONCELOS DE PAIVA FILHO

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO
CERRADO

Dissertação apresentada à UniRV – Universidade de
Rio Verde, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*

APROVAÇÃO: 19 de abril de 2022.



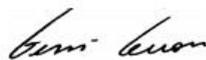
Prof.ª. Dra. Rose Luiza Moraes Tavares
Presidente da Banca Examinadora
Membro – FA/UniRV



Prof. Dr. Matheus de Freitas Souza
Membro – FA/UniRV



Prof. Dr. Gilmar Oliveira Santos
Membro – FA/UniRV



Dr. Gessi Ceccon
Embrapa Agropecuária Oeste

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pela oportunidade de realizar o Mestrado em Produção Vegetal na linha de pesquisa em Manejo do Solo na Universidade de Rio Verde (UniRV).

A minha mãe, Altair Ribeiro de Paiva, que de forma direta e indiretamente, contribuiu para que este sonho acontecesse. Aos meus professores, orientadores e coorientadores que se tornaram mais que instrutores nesta carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de concluir uma pós-graduação ao nível de mestrado. Aos meus familiares, em especial minha mãe Altair Ribeiro de Paiva, por me apoiar e ajudar de forma indireta e/ou diretamente para que este sonho se realizasse.

Agradeço principalmente à Professora. Dra. Rose Luiza Moraes Tavares, sempre presente e ativa, me conduzindo com um apoio extraordinário. À minha coorientadora, Prof. Dra. Camila Jorge Bernabé Ferreira sempre disposta a me auxiliar desde a graduação.

Agradeço aos amigos em especial a Camila dos Santos Ferreira, Neury José Graciano da Silva, que em convívio todos os dias sempre me auxiliaram, não somente na parte profissional quanto no pessoal.

Agradeço aos alunos de graduação que contribuíram com este projeto, na prática de forma integral, mostrando sua capacidade e dedicação. Sem dúvidas, foi indispensável para que esta conclusão tenha se consolidado. Em especial as acadêmicas Lorryne Paula Guimarães, Isabelly Dias Vieira, Izabely Alves Lopes, que estiveram em toda a etapa do projeto sempre dispostas a ajudar e a contribuir.

Aos amigos que conquistei antes e durante o projeto, que sempre me incentivaram a continuar na pesquisa, mesmo com todas as dificuldades.

Ao professor Dr. Gilmar Oliveira Santos, que no desenvolvimento do experimento sempre esteve a disposição para me auxiliar.

Agradeço ao centro tecnológico comigo, por permitir a realização deste projeto em sua área de pesquisa e a todos os pesquisadores e demais funcionários que acolheram nossa equipe de forma tão generosa e ética, sempre atenciosos e pacienciosos conosco. Em especial, ao professor Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto, pela confiança em minha pessoa, e por toda a sua disponibilidade durante a condução deste trabalho. Ao pesquisador Dr. Diego Tolentino de Lima que mesmo não fazendo parte da equipe desta pesquisa foi essencial para a conclusão deste trabalho, também, ao pesquisador Dr. Hemython Luis Bandeira do Nascimento o qual sanou muitas das minhas dúvidas durante a condução da pesquisa.

Agradeço também aos colaboradores do laboratório multiusuários da UniRV, por toda paciência e auxílio durante a confecção dos dados da pesquisa.

BIOGRAFIA

Silvio Vasconcelos de Paiva Filho concluiu o curso de Agronomia em 2019 pela Universidade de Rio Verde com monografia intitulada: “Qualidade física de um latossolo vermelho de cerrado sob diferentes forrageiras do gênero *Urochloa*”. Realizou Projetos de Pesquisa na área de física e manejo do solo como bolsista de Iniciação Científica PIBIC-PIVIC (2017/2018 – 2018/2019), com os seguintes temas: “Mesa de tensão para análises de macro e microporosidade do solo”, “Determinação da densidade e porosidade do solo em sistemas de consórcio agrícola. ” Publicou resumos em anais de eventos e artigos científicos em revistas indexadas, especial a publicação no anuário de pesquisa da Comigo 2020/2021.

Logo após a conclusão do curso de graduação, iniciou o mestrado em Produção Vegetal na área de Grandes Culturas, Manejo de solo: Estudo das áreas de física, manejo e conservação do solo para uso racional das áreas agrícolas, com a seguinte proposta de dissertação para defesa: “Qualidade física do solo em sistemas de produção agrícola no cerrado”.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
RESUMO GERAL.....	vii
GENERAL ABSTRACT.....	viii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
REFERÊNCIAS.....	5
CAPÍTULO 1 - VARIAÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE NO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA E VEGETAÇÃO NATURAL NO CERRADO.....	8
RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
4 CONCLUSÃO.....	21
REFERÊNCIAS.....	21
CAPÍTULO 2 - QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO.....	26
RESUMO.....	26
ABSTRACT.....	27
1 INTRODUÇÃO.....	28
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4 CONCLUSÕES.....	41
REFERÊNCIAS.....	42
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Granulometria de um Latossolo Vermelho distrófico em área sob vegetação natural e diferentes sistemas de produção em Rio Verde, Goiás, Brasil.....	12
TABELA 2	Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico em área com diferentes sistemas de produção, em Rio Verde, Goiás, Brasil.....	29
TABELA 3	Valores médios de atributos físicos do solo e de carbono em diferentes profundidades do solo e sistemas de produção agrícola no Cerrado.....	34
TABELA 4	Análise de correlação de parâmetros físicos do solo em diferentes profundidades do solo no Cerrado.....	36
TABELA 5	Variância explicada (%) de atributos físicos do solo em diferentes profundidades e sistemas de produção agrícola no Cerrado.....	37
TABELA 6	Nota de qualidade estrutural do solo avaliado pelo método “Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo” - DRES em solo com diferentes sistemas de cultivo no Cerrado.....	41

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Montagem dos transectos e saturação do solo para avaliações nos diferentes sistemas de produção em um Latossolo Vermelho distrófico em Rio Verde, Goiás, Brasil.....	13
FIGURA 2	Variação temporal da resistência à penetração e umidade do solo em áreas agrícolas sob sistema de plantio direto com 3 e 10 anos de estabelecimento (SPD 3, SPD 10) e integração lavoura-pecuária com 9 anos (ILP 9) avaliados nas camadas 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40 m.....	16
FIGURA 3	Efeito comparativo das camadas do solo para a resistência do solo à penetração e umidade do solo em diferentes sistemas de cultivo e mata nativa no Cerrado.....	18
FIGURA 4	Análise de correlação entre resistência do solo à penetração em diferentes sistemas de cultivo no Cerrado.....	19
FIGURA 5	Efeito de sistemas de produção agrícola e histórico de instalação na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho em Rio Verde - GO.....	20
FIGURA 6	Diagrama de dispersão biplot de escores dos componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2) de atributos físicos do solo, avaliados nas camadas do solo de 0,00-0,10 (A), 0,10-0,20 (B), 0,20-0,40 (C) e 0,40-0,60 m (D) em ambientes de produção agrícola.....	38
FIGURA 7	Dendograma de interrelação de sistemas de produção agrícola.....	39

RESUMO GERAL

PAIVA FILHO, Silvio Vasconcelos.M.S., UniRV – Universidade de Rio Verde, abril de 2022. **Qualidade física do solo em sistemas de produção agrícola no Cerrado.** Orientador: Profa. Dra. Rose Luiza Moraes Tavares. Coorientadora: Profa. Dra. Camila Jorge Bernabé Ferreira.

Sistemas conservacionistas que promovem ao solo, boas condições de uso, estão sendo cada vez mais adotados por produtores no Cerrado. Assim avaliaram-se os comportamentos físicos de um Latossolo em dois anos distintos (2020 para capítulo I e 2021 para capítulo II). O objetivo foi avaliar a qualidade física do solo em sistemas de produção agrícola no Cerrado. Para isto, o trabalho foi dividido em capítulos, sendo que no Capítulo I, objetivou-se avaliar a variação temporal da resistência à penetração (RP) após saturação do solo em diferentes sistemas de produção no Cerrado. Foram avaliadas quatro áreas distintas, dois sistemas de plantio direto (SPD 3 e 10 anos), uma integração lavoura-pecuária (ILP 9 com *Urochloa hybrida* cv. Mavuno) e uma vegetação nativa. Em cada área, delimitou-se 4 transectos (2 m x 0,25 m) e o solo dentro dos transectos saturado. Após isto, foram feitas medições de RP diariamente em 10 pontos do transecto, por um período de 11 dias, até 0,40 m de profundidade e simultaneamente foi determinada a umidade do solo. Também foi realizada a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat). Foi realizada a análise de desvio padrão, com um gráfico de médias diárias para cada tratamento em relação às camadas do solo e realizada para esta relação a análise de correlação linear. No capítulo II, objetivou-se avaliar atributos físicos de um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa com sistemas de plantio direto (SPD) e integração lavoura pecuária (ILP), usando uma área de vegetação nativa como referência de conservação de solo. Foram avaliados 7 tratamentos, sendo eles: duas áreas com SPD (4 e 11 anos), quatro com ILP: ILP 5 anos com cultivo de *Urochloa hybrida* cv. Mavuno e *Urochloa hybrida* cv. Mulato, ILP de 10 anos com os mesmos cultivos, e uma área de vegetação nativa. Foram realizadas avaliações de solo na profundidade de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m com 4 repetições por área, sendo: densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, resistência do solo à penetração, umidade gravimétrica, porosidade de aeração, diâmetro médio ponderado de agregados, carbono orgânico e diagnóstico rápido da estrutura do solo. Realizou-se a análise de variância, aplicando o teste de comparação de médias de Tukey a 5% de probabilidade, adicionalmente foi realizada a análise de componentes principais e a análise de “Cluster”. Diante disso conclui-se que todos os sistemas de produção avaliados apresentaram aspectos físicos do solo inferior ao solo da vegetação nativa, independentemente do tempo de implantação. As diferenças entre sistemas de produção diferiram nas camadas intermediárias (0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m) quando comparadas com a camada superficial.

Palavras - chave: Integração lavoura pecuária, plantio direto, *Urochloa*.

GENERAL ABSTRACT

PAIVA FILHO, Silvio Vasconcelos.M.S., UniRV - University of Rio Verde, April 2022. **Soil physical quality in agricultural production systems in the cerrado.** Advisor: Prof. Dr. Rose Luiza Moraes Tavares. Co-advisor: Prof. Dr. Camila Jorge Bernabé Ferreira.

Conservation systems that promote good conditions of use to the soil are being increasingly adopted in the Cerrado. Thus, the physical behaviors of an oxisol were evaluated in two distinct years (2020 for chapter I and 2021 for chapter II). The objective was to evaluate soil physical quality in agricultural production systems in the Cerrado. For this, the work was divided into chapters, and in Chapter I, the objective was to evaluate the temporal variation of penetration resistance (PR) in saturated soil under different agricultural production systems submitted to natural soil drying in the Cerrado. While in Chapter II, evaluate physical attributes of a dystrophic oxisol of clayey texture under systems of no-tillage (NT) and crop livestock integration (CLI), using an area of native vegetation as a reference of soil conservation. For Chapter I, four distinct areas were evaluated, two no-tillage systems (NT 3 and 10 years), a crop livestock integration (CLI 9 with *Urochloa hybrid cv. Mavuno*) and native vegetation. In each area, 4 Transects (2 m x 0.25 m) and the soil within the saturated Transects were delimited. After this, PR measurements were taken daily at 10 transect points, for a period of 11 days, up to 0.40 m deep and soil moisture was simultaneously determined. The hydraulic conductivity of saturated soil (Ksat) was also determined. For chapter II, six treatments were evaluated: two areas with NT (4 and 11 years), four with CLI: CLI 5 years under *cultivation of cv hybrid Urochloa cv. Mavuno* and *Urochloa hybrid cv. Mulato*, CLI of 10 years under the same crops, and an area under native vegetation. Soil evaluations were performed at depths of 0.00 – 0.10; 0.10 – 0.20; 0.20 – 0.40 and 0.40 – 0.60 m with 4 replicates per area, which were: soil density, total porosity, macro and microporosity, soil resistance to penetration, gravimetric moisture, aeration porosity, weighted average diameter of aggregates, organic carbon, and rapid diagnosis of soil structure. In chapter I, the standard deviation analysis was performed, with a graph of daily means for each treatment in relation to soil layers and linear correlation analysis was performed for this relationship. In chapter II, the analysis of variance was performed, applying the comparison test of Tukey means at 5% probability, additionally the principal component analysis and the "Cluster" analysis were performed. Therefore, it is concluded that all the production systems evaluated presented physical aspects of the soil inferior to the soil under native vegetation, regardless of the time of implantation. The differences between production systems differed in the deeper layers (0.10 – 0.20 and 0.20 – 0.40 m) when compared to the surface layer.

Keywords: Crop livestock integration, no-tillage, *Urochloa*.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura intensiva pode reduzir a qualidade física, química e biológica dos solos, e conseqüentemente, o rendimento agrícola ao longo das safras no bioma Cerrado sob a manejos inadequados tende a tornar o solo improdutivo com o passar dos anos, podendo afetar a qualidade do sistema e o rendimento agrícola. Com intuito de minimizar este problema, alternativas viáveis de conservação do solo devem ser utilizadas.

Sistemas de cultivos que priorizam a incorporação de restos vegetais e a melhoria da qualidade física do solo tendem a influenciar positivamente na disponibilidade hídrica do solo para culturas, permitindo melhor distribuição das raízes no perfil. A estrutura do solo tem por característica física, estabelecer o arranjo de partículas sólidas e dos vazios que elas se associam, influenciando na aeração, drenagem de água e atividades biológicas. A estrutura é uma importante propriedade que define a qualidade e o ambiente de desenvolvimento radicular.

Práticas agrícolas que promovem benefícios ao solo, como plantas de cobertura, mínimo revolvimento, e rotação de culturas, potencializam o incremento de matéria orgânica, que têm como característica principal, proporcionar à agregação e à estabilização das partículas do solo, essenciais à conservação do solo e redução da erosão, bem como a manutenção de água no solo. A conservação da palha no solo, protege o mesmo de adversidades climáticas e da evaporação de água, perdurando a sua disponibilidade de água no solo para utilização pelas culturas.

Nesta perspectiva, sistemas de manejo como Plantio Direto (SPD) e Integração Lavoura Pecuária (ILP) quando bem administrados são grandes aliados na preservação e manutenção da qualidade do solo. Estes sistemas têm como objetivo simular a serrapilheira de florestas através da deposição de palhada sobre o solo, gerando benefícios ao solo de caráter físico, químico e biológico. Tais benefícios irão promover boa estrutura de perfil de solo, maior aporte de matéria orgânica e aproveitamento do perfil do solo pelas raízes que facilitam e beneficiam a infiltração e armazenamento de água.

Nesse caso, o trabalho foi realizado com o objetivo identificar sistemas de manejo de solo que promovam melhorias na qualidade física do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A massa seca proveniente de resíduos vegetais, depositada no solo é facilmente decomposta em decorrência do clima característico do Cerrado que advém de uma zona tropical, composta de alta influência de massas de ar quente, com índices pluviométricos de 1600 mm anuais com distribuição de chuvas desuniformes e temperaturas elevadas quase o ano todo (médias térmicas em torno de 23,4 °C) (LOPES SOBRINHO et al., 2020).

A massa seca vegetal sobre o solo é essencial, devido aos benefícios proporcionados por esta, dentre estes, podem-se citar a proteção do solo de chuvas intensas, controle de temperatura e de umidade do solo, evitando a evaporação de água, além da adição gradual de matéria orgânica no perfil do solo. De acordo com Silva et al. (2020), a ausência de massa seca aumenta a tensão de água no solo e como consequência diminui a área foliar das culturas, podendo afetar a produtividade.

A camada superficial passa por alterações de acordo com o manejo, práticas que promovem maior aporte de massa vegetal proporcionam relação positiva entre os agregados estáveis e o carbono orgânico no solo, sendo que quanto maior o teor de carbono, maior a proporção de agregados na classe de 2 mm, em contrapartida, quanto menor o teor orgânico de carbono, maior o percentual de agregados menores que 2 mm (WOLSCHICK et al., 2018).

A diminuição da estabilidade estrutural dos solos, por vezes, deve-se as mudanças nas propriedades físico-químicas, essas instabilidades, podem ser superadas e/ou evitadas com a adoção de manejos de cultivos diversificados, principalmente se o sistema de cultivo incluir a presença de restos culturais dispostos sobre solo durante todo o ano (NUNES et al., 2021).

A estabilidade estrutural de solos, associada a resistência do solo à penetração (RP) relacionada ao teor de argila, umidade, densidade e porosidade do solo, afetam o desenvolvimento radicular e influenciam diretamente no desenvolvimento das plantas. Os valores altos de RP associados a altos teores de argila, baixa umidade do solo e porosidade, afetam negativamente o desenvolvimento radicular (LEIVA et al., 2021; SOUZA et al., 2021).

A perda de umidade do solo em decorrência da baixa deposição de massa seca tende a impactar negativamente nos valores de RP, porém, essa relação é suavizada em sistemas com maior aporte de palha, tendo um efeito positivo no decorrer dos anos, acumulando resíduos e preservando o poder matricial do solo (FERNANDES et al., 2016, FERREIRA et al., 2018).

A forte relação desempenhada pela umidade do solo sobre a RP tem influência direta no desenvolvimento radicular das culturas, sempre que ocorre um intervalo hídrico menor, se

eleva a resistência mecânica do solo, evidenciando condições restritivas ao crescimento radicular, mesmo para umidades acima do ponto de murcha permanente (FAUSTINO; MARCIANO, 2021).

Os efeitos interativos entre a RP, a arquitetura da raiz e a água disponível às plantas, são fatores que afetam diretamente o desenvolvimento das culturas. As raízes têm o seu crescimento dificultado em resposta ao aumento da resistência da camada subsuperficial do solo, aumentando a absorção de água da camada superficial.

Como consequência ao baixo índice de crescimento da raiz em camadas mais profundas do solo, a captação de água do subsolo é restrita, diminuindo o crescimento da planta e a sua produtividade (COLOMBI et al., 2018).

A adição de matéria orgânica (palha), “biocarvão” ou polímeros sintéticos, são opções para reduzir os efeitos da estiagem, estes incrementos favorecerem o desenvolvimento radicular, aumentando a capacidade de armazenamento de água no solo Klein; Klein. (2015).

A umidade é uma variável que está conectada à distribuição do tamanho das partículas e ao comportamento de compressão e descompressão do solo, ou seja, a medida em que a umidade é elevada há o aumento da expansão dos poros (REICHERT et al., 2018), permitindo maior permeabilidade e aeração, em contrapartida, quando o solo recebe uma carga superior à capacidade de suporte, as forças mecânicas alteram a estrutura do solo, reduzindo o espaço poroso e elevando a densidade.

A redução no volume dos poros e a mudança na distribuição de tamanho das partículas, diminuem a conectividade, tortuosidade, a capacidade de transporte de fluidos, transporte de gás por adjeção e difusão, e armazenamento de água, conseqüentemente, alterando as reações químicas prevaletentes e a disponibilidade de nutrientes, aumentam as restrições para o crescimento de raízes (KELLER et al., 2017).

Situações de solos úmidos, quando submetidos ao tráfego intenso de máquinas e a revolvimentos recentes, com baixa cobertura vegetal tornam o solo suscetível a compactação (VIZIOLI et al., 2021). Por este motivo, agricultores do Cerrado vêm optando por sistemas conservacionistas que priorizam a conservação da massa vegetal após o cultivo na superfície do solo ao invés de ser retirada ou incorporada.

O SPD foi adotado pela região do Cerrado por volta de 1980, essa prática é composta de três princípios básicos, mínimo revolvimento do solo, a rotação de culturas e a conservação da palhada na superfície, promovendo o incremento de matéria orgânica e conseqüentemente, melhorando a estrutura do solo (COSTA et al., 2015).

Outras práticas auxiliares ao plantio direto estão sendo adotadas, como, por exemplo, o consórcio de culturas entre milho e braquiária e a utilização de culturas com maior aporte de massa seca na segunda safra, como as espécies do gênero *Brizantha*, o feijão-guandu e o sorgo forrageiro (SANTOS et al., 2014). A adoção de sistemas de produção mais complexos e diversificados podem favorecer o sinergismo entre os componentes, para resultar em melhor estruturação física do solo (TORRES et al., 2018).

O efeito benéfico das culturas de cobertura é observado a médio e longo prazo, levando a melhoria na qualidade da física do solo. De acordo com Soares et al. (2021), dentre as plantas de cobertura observadas em seu estudo, a *Urochloa brizantha* foi a espécie que forneceu maior acúmulo de matéria seca no solo.

Com base na grande densidade de raízes, a *Urochloa brizantha* tem estabelecido um maior potencial para melhorar a estrutura e a qualidade do solo, as raízes profundas e volumosas, melhoraram a estrutura do solo ao romper camadas compactadas, potencializando a produção de agregados antes adensados pela compressão advinda do tráfego de máquinas pesadas. A adoção de sistemas como a Integração Lavoura Pecuária (ILP) surge como estratégia para acelerar a recuperação do solo (STUMPF et al., 2018).

O uso de forrageiras como as do gênero *Urochloa*, tem sido escolhida por produtores rurais para compor sistemas de cultivos consorciados devido à capacidade dessa gramínea em emitir grande volume radicular produzir em diferentes condições de clima e solo, favorecendo a aeração do solo (ANACHE et al., 2018).

Quando comparados atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo, Salton et al. (2014) encontraram maior estabilidade de agregados no solo em área com agricultura de grãos e pastoreio de gado (ILP), o qual obteve um diâmetro médio ponderado de agregados significativamente maior, aproximadamente 20%, em comparação ao SPD, resultado do crescimento de raízes e hifas fúngicas, presença de resíduos de plantas, insetos e outros organismos no ILP.

Além dos benefícios físicos de solo, o sistema ILP traz também benefícios químicos ao solo. Em estudo de Soares et al. (2020), foi observado que o SPD obteve a menor taxa de massa seca dentre todos os tratamentos avaliados (sistemas ILP), possivelmente este seja um dos motivos pelo qual o SPD tenha apresentado valores 50% menores de nitrogênio (N) no solo em comparação ao ILP.

Sistemas de integração ILP são superiores na promoção biológica do solo quando comparados com SPD. A presença da implementação de pastagens no ILP, com maior frequência em relação a SPD, tende a aumentar e incrementar maiores teores de matéria

orgânica do solo (MOS). No ILP, considera-se ideal deixar de 40 – 60% do ano agrícola para pastagens, isso favorece o ambiente microbiológico do solo (PANETTIERRI et al., 2020).

Manejos que buscam promover a regeneração natural do solo como SPD e ILP, tendem a melhorar atributos do solo com o aumento da infiltração, redução do escoamento superficial e erosão do solo. Portanto, é necessário melhorar o uso do solo a fim de conservar o ambiente promovido pela vegetação natural e diminuir a necessidade de desmatamento em áreas de cerrado (FALCÃO et al., 2020).

Estes sistemas (SPD e ILP) visam se aproximar da vegetação natural onde os atributos físicos e biológicos são favorecidos, ocorrendo principalmente, através do acúmulo de matéria orgânica do solo e atividades da macrofauna que promovem um solo saudável estrutural, com aumento da porosidade e diminuição subsequente na densidade e resistência do solo à penetração, resultando em uma melhor qualidade do solo (BRASIL NETO et al., 2021).

REFERÊNCIAS

- ANACHE, J. A. A.; FLANAGAN, D. C.; SRIVASTAVA, A.; WENDLAND, E. C. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado. **Science of the Total Environment**, v. 622-623, n. 1, p. 140-141, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.257
- BRASIL NETO, A. B.; BRASIL, N. M. Q. X.; ANDRADE, P. I. L.; SAMPAIO, A. C. F.; NORONHA, N. C.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, A. R.; SCHWARTZD, G. The commercial tree species *Dipteryx odorata* improves soil physical and biological attributes in abandoned pastures. **Ecological Engineering**, v. 160, n. 1, e106143, 2021. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.106143
- COELHO, L. L. MARCHESAN, E.; DE OLIVEIRA, M. L.; SERAFIN, A. D.; SCHÜTZ, R. P.; SOARES, C. F.; ARAMBURU, B.B. Seeding furrow opening mechanisms and the soybean planting in lowland areas. **Ciência Rural**, v. 50, n. 6, e20190870, 2020. DOI: 10.1590/0103-8478cr20190870
- COLOMBI, T.; TORRES, L. C.; WALTER, A.; KELLER, T. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, n. 1, p. 1026-1035, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.129
- COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; LOPES, K. S. M.; YOKOBATAKE, K. L.; FERREIRA, J. P.; PARIS, C. M.; BONINI, C. S. B.; LONGHINI, V. Z. Atributos do Solo e Acúmulo de Carbono na Integração Lavoura-Pecuária em Sistema Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 852-863, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20140269

FALCÃO, K. S.; PANACHUKI, E.; MONTEIRO, F. N.; MENEZES, R. S.; RODRIGUES, D. B. B.; SONE, J. S.; OLIVEIRA, P. T. S. Surface runoff and soil erosion in a natural regeneration area of the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 8, n. 2, p. 124-130, 2020. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.04.004

FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Least limiting water range and critical bulk density values as recovery indicators of a soil under forest and pasture systems. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 658-682, 2021. DOI: 10.5902/1980509833474

FERNANDES, K. L.; RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J.; CUSTÓDIO, G. D.; BARROS, L. R. Influence of time management in modeling of curve resistance to the penetration of a latosol under different uses and management of pastures and native woodland. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 519-527, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000300015

FERREIRA, C. J. B.; TORMENA, C. A.; CECATO, U.; FRANCO, H. H. S.; MOREIRA, W. H.; GALBEIRO, S.; RIBEIRO, O. S. Soil physical properties under a 'Tanzânia' grass pasture fertilized with mineral nitrogen or intercropped with stylosanthes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 4, p. 478-486, 2018. DOI: 10.1590/S0100-204X2018000400009

KELLER, T.; COLOMBI, T.; RUIZ, S.; MANALILI, M. P.; REK, J.; STADELMANN, V.; WUNDERLI, H.; BREITENSTEIN, D.; REISER, R.; OBERHOLZER, H.; SCHYMANSKI, S.; ROMERO-RUIZ, A.; LINDE, N.; WEISSKOPF, P.; WALTER, A.; OR, D. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 4, p. 1-16, 2017. DOI: 10.2136/vzj2016.11.0118

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias Para Potencializar a Retenção E Disponibilidade De Água No Solo. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 19, n. 1, p. 21-29, 2015. DOI: 10.5902/2236117014990

LEIVA, J. O. R.; SILVA, R. A.; FRANÇA E SILVA, E. F.; SIQUEIRA, G. M. Análise multifractal da resistência do solo à penetração em diferentes pedoformas. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 1, p. 189-198, 2021. DOI: 10.1590/1983-21252021v34n119rc

LOPES SOBRINHO, O. P.; SANTOS, L. N. S.; SANTOS, G. O.; CUNHA, F. N.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B. Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. 2, p. 19-33, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v27i0.68692

NUNES, M. R.; VAZ, C. M. P.; PESSOA, T. N.; JOSÉ E. DENARDIN, J. E.; KARLEN, D. L.; GIAROL, N. F. B.; LIBARDI, P. L. Inherent and dynamic effects on the structural stability of Brazilian Oxisols. **Geoderma Regional**, v. 27, n. 1, e00426, 2021. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00426

PANETTIERI, M.; GUIGUE, J.; PREVOST-BOURÉ, N. C.; THÉVENOT, M.; LÉVÊQUE, J.; GUILLOU, C. L.; MARON, P. A.; SANTONI, A. L.; RANJARD, L.; MOUNIER, S.; MENASSERI, S.; VIAUD, V.; MATHIEU, O. Grassland-cropland rotation cycles in crop-livestock farming systems regulate priming effect potential in soils through modulation of microbial communities, composition of soil organic matter and abiotic soil properties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 299, n. 1, e106973, 2020. DOI: 10.1016/j.agee.2020.106973

- REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; RODRIGUES, M. F.; CAVALLI, J. P.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. **Catena**, v. 165, n. 1, p. 345-357, 2018. DOI: 10.1016/j.catena.2018.02.014
- SANTOS, I. L.; CAIXETA, C. F.; SOUSA, A. A. T. C.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; CARVALHO, A. M. Cover plants and mineral nitrogen: effects on organic matter fractions in an oxisol under no-tillage in the cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1874-1881, 2014. DOI:10.1590/S0100-06832014000600022
- SALTON, J. C.; FABIO M. MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCEN, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, n. 1, p. 70-79, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.09.023
- SILVA, J. A.; SANTOS, P. A. B.; CARVALHO, L. G.; MOURA, E. G.; ANDRADE, F. R. Gas exchanges and growth of soybean cultivars submitted to water deficiency. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, n. 1, p.1281-1291 2020. DOI: 10.1590/1983-40632020v5058854
- SOARES, M. B.; TAVANTI, R. F. R.; RIGOTTI, A. R.; LIMA, J. P.; FREDDI, O. S.; PETTER, F. A. Use of cover crops in the southern Amazon region: What is the impact on soil physical quality? **Geoderma**, v. 384, n. 2021, e114796, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114796
- SOARES, M. B.; FREDDI, O. S.; MATOS, E. S.; TAVANTI, R. F. R.; WRUCK, F. J.; LIMA, J. P.; MARCHIORO, F.; FRANCHINI, J. C. Integrated production systems: An alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. **Catena**, v. 185, n. 1, e104279, 2020. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104279
- SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A. P. F.; ALMEIDA, A. Q.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. **Soil and Tillage Research**, v. 205, n. 1, e104768, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104768
- STUMPF, L.; LEAL, O. A.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S.; REIS, D. A.; PINTO, M. A. B.; TUCHTENHAGEN, I. K. Tensile strength and organic matter fractions in aggregates of a grass covered mined soil under early stage recovery. **Soil and Tillage Research**, v. 176, n. 1, p. 69-76, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2017.11.006.
- TORRES, J. L. R.; ASSIS, R. L.; LOSS, A. Evolução entre os sistemas de produção agropecuária no Cerrado: convencional, Barreirão, Santa Fé e Integração Lavoura-Pecuária. **Informe Agropecuário**, v. 39, n. 302, p. 7-17, 2018.
- VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 209, n. 1, e104935, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2021.104935
- WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; BAGIO, B.; KAUFMANN, D. S. Long-term effect of soil use and management on organic carbon and aggregate stability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 1, e0170393, 2018. DOI: 10.1590/18069657rbcs20170393

CAPÍTULO I

VARIAÇÃO TEMPORAL DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM FUNÇÃO DA UMIDADE NO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA E VEGETAÇÃO NATURAL NO CERRADO

RESUMO

O monitoramento da resistência do solo à penetração em função da variação de umidade deste pode auxiliar na indicação de valores de umidade críticos para o crescimento de raiz e manejo do solo, podendo variar de acordo com o sistema de produção agrícola. Com base nisso, este trabalho foi realizado com objetivo de monitorar a variação temporal da resistência à penetração (RP) após saturação do solo sob diferentes sistemas de produção no Cerrado. As avaliações foram realizadas em setembro de 2020, sob quatro áreas, dois sistemas de plantio direto (SPD 3 e 10 anos de implementação) com sucessão de soja (*Glycine max*) / milho (*Zea mays*), uma integração lavoura-pecuária (ILP 9 anos de implementação) com sucessão soja / forrageira (*Urochloa hibrida* cv. Mavuno) e uma vegetação nativa como referência. Em cada área, foram delimitados 4 transectos (2 m x 0,25 m), com retirada, quando houve, da palhada da superfície. A área delimitada foi saturada. Após a referida etapa, as medições de RP foram realizadas diariamente (9 – 11h) em 10 pontos do transecto, distanciados a cada 0,10 m, por um período de 11 dias, com medição de RP em cada ponto até 0,40 m de profundidade. Junto a RP foi determinada a umidade do solo nas camadas de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m e posteriormente a essas avaliações, após uma precipitação de 36 mm, foi realizada a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat). Na camada 0,10 – 0,20 m, os valores de RP foram mais contrastantes quando comparado com as demais camadas, sendo que a área de SPD 3 apresentou menor valor de RP (1,65 MPa) quando comparado com SPD 10 e ILP 9 com 2,48 e 2,69 MPa, respectivamente. Além disso, foi possível indicar valores de umidade do solo ideais para manejo visando menor resistência do solo à compactação, sendo de 0,20 kg kg⁻¹ no SPD 3, variação de 0,19 – 0,20 kg kg⁻¹ no SPD 10 e de 0,23 – 0,20 kg kg⁻¹ no ILP 9.

Palavras - chave: plantio direto, integração lavoura pecuária, condutividade hidráulica.

CHAPTER 1

TEMPORAL VARIATION OF PENETRATION RESISTANCE AS A FUNCTION OF SOIL MOISTURE VARIATION IN DIFFERENT AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS IN THE CERRADO

ABSTRACT

Monitoring soil penetration resistance as a function of soil moisture variation can help indicate critical moisture values for root development and soil management. And this may vary depending on the agricultural production system. Based on this this work aimed to evaluate the temporal variation of penetration resistance (PR) after soil saturation under different production systems in the Cerrado. The evaluations occurred at the end of the off-season period of 2020, under four distinct areas, two no-tillage systems (NT 3 and 10 years of implementation) with succession of soybeans (*Glycine max*)/ corn (*Zea mays*), a crop livestock integration (CLI 9 years of implementation) with soybean/forage succession (*Urochloa hybrid* cv. Mavuno) and a native vegetation as a reference. In each area, 4 transacts (2 m x 0.25 m) were delimited, with removal, when there was, of the surface straw. The bounded area was saturated. After this, the PR measurements were made daily (9 - 11h) at 10 transects points, distanced every 0.10 m, for a period of 11 days, with PR measurement at each point up to 0.40 m depth. Next to the RP, soil moisture was determined at depths of 0.00 – 0.10; 0.10 – 0.20 and 0.20 – 0.40 m and after these evaluations, after a precipitation of 36 mm, the hydraulic conductivity of saturated soil (Ksat) was determined. The results showed that in the 0.10 – 0.20 m layer, the PR values were more contrasting when compared to the other depths, and the area NT 3 presented lower RP value (1.65 MPa) when compared with NT 10 and CLI 9 with 2.48 and 2.69 MPa, respectively. In addition, it was possible to indicate ideal soil moisture values for management aiming at greater soil resistance to compaction, being 0.20 kg kg⁻¹ in NT 3, variation of 0.19 – 0.20 kg kg⁻¹ in NT 10 and 0.23 – 0.20 kg kg⁻¹ in CLI 9.

Keywords: Crop livestock integration, no-tillage, hydraulic conductivity.

1 INTRODUÇÃO

Solos úmidos submetidos ao tráfego excessivo de máquinas, aliados a baixa cobertura vegetal, são condições que aumentam a susceptibilidade do solo a compactação (VIZIOLI et al., 2021). Por esta razão, agricultores da região do Cerrado, estão passando a optar por sistemas conservacionistas que priorizam a conservação da massa vegetal sobre o solo após o cultivo e a qualidade das propriedades constituintes do sistema solo-planta.

A qualidade física do solo deve ser constantemente monitorada para adotar estratégias de manejo que possam prevenir ou aliviar a compactação do solo, independentemente do sistema de cultivo (LUZ et al., 2019), uma das maneiras de realizar o monitoramento é a partir da avaliação da resistência do solo à penetração (RP), a qual juntamente com dados de teor de água, demonstram ser ferramentas eficazes no prognóstico da compactação do solo (BENEVENUTE et al., 2020).

A relação entre umidade do solo sobre a resistência do solo à penetração tem influência direta no desenvolvimento radicular das culturas, sempre que ocorre uma menor umidade, se eleva a resistência mecânica do solo, evidenciando condições restritivas ao crescimento radicular (FAUSTINO; MARCIANO, 2021).

Os valores considerados críticos de resistência à penetração variam de acordo com o tipo de solo, consistência, manejo adotado, entre outros fatores. Entretanto, alguns autores têm adotado o valor de até 2,0 MPa como limite máximo desejável para solos do tipo Latossolo (TORMENA et al., 1998; ASGARZADEH et al., 2011; MOURA et al., 2021).

Todavia outros autores, sugerem maiores valores de RP, como limite crítico, em solos sob sistema plantio direto, argumentando que as condições estruturais são menos restritivas, devido a incorporação de massa vegetal e as culturas inseridas, permitindo o crescimento radicular (EHLERS et al., 1983; MORAES et al., 2014).

Contudo segundo Leão et al. (2006) e Vizioli et al. (2021) o valor limitante de RP pode ser diferente de acordo com a cultura em desenvolvimento sobre o Latossolo, fazendo que se adote valores de 2,0 MPa como uma forma mais conservadora a se estabelecer uma resistência a penetração crítica padrão.

Sistemas conservacionistas como sistema de plantio direto (SPD) e integração lavoura pecuária (ILP), são práticas que preconizam por ausência de revolvimento do solo, com adição significativa de palhada, importante aliada no manejo e conservação do sistema. Solos manejados sob esses sistemas, apresentam maior estruturação, melhorando o índice de

agregação, elevando a porosidade, além de propiciarem boas condições para o desenvolvimento radicular (FAVARATO et al., 2016; PIAZZA et al., 2020; SILVA et al., 2021)

Os parâmetros físicos do solo em sistemas naturais, como a mata nativa se tornam um modelo em relação ao teor de água, interagindo com outros fatores determinantes na consolidação do perfil de solo, como a textura e a densidade do solo. Estes fatores podem ser usados para determinar qual manejo e cultura serão mais capazes de preservar a estrutura do solo, reduzindo assim, impactos ambientais decorrentes dos manejos agrícolas como erosão, compactação e incremento de massa vegetal (SOUZA et al., 2021).

Melhores evidências nas alterações das propriedades físicas e químicas do solo como a descompactação têm sido observadas com a diversificação de culturas, como exemplo as famílias Poaceas e Fabáceas, fato ligado à atuação de diferentes sistemas radiculares sobre o solo (FRANCZISKOWSKI, 2019).

Neste tipo de prática, espera-se que além dos benefícios voltados aos atributos físicos do solo, o ambiente de produção agrícola como um todo seja beneficiado, proporcionando proteção ao solo contra impactos de gotas de água, incrementando matéria orgânica e diminuindo emergências de plantas daninhas (BÜCHI, 2018).

Nessa perspectiva, este trabalho foi realizado com o objetivo monitorar a variação temporal da resistência à penetração (RP) após saturação do solo sob diferentes sistemas de produção no Cerrado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Área Experimental

O experimento foi conduzido no Instituto de Ciência e Tecnologia Comigo (ITC), em Rio Verde - GO. O clima é classificado em B4 rB'4a' (úmido, pequena deficiência hídrica, mesotérmico e evapotranspiração no verão menor que 48%) de acordo com Köppen (LOPES SOBRINHO et al., 2020).

As áreas utilizadas para o experimento encontram-se nas coordenadas 17^o 45' 48'' S e 51^o 02' 14'' W, com altitude de 832 m. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018).

A adubação de semeadura foi realizada, de forma geral para todos os sistemas, no sulco com 400 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 08-20-18, equivalente a 32, 80, 72 kg ha⁻¹ de nitrogênio, de fósforo e de potássio, respectivamente. Em 20/03/2020 as parcelas de 2.930 m², receberam a adubação de cobertura com 200 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 20-00-20, equivalente a 40 e 72 kg ha⁻¹ de nitrogênio e de potássio, respectivamente.

Tratamentos

Os tratamentos avaliados constam de áreas com diferentes sistemas de produção agrícola, sendo 2 (duas) áreas com o sistema de plantio direto (SPD) com sucessão de soja (*Glycine max*) / milho (*Zea mays*) inseridas em 2010 e 2018, 1 com o sistema integração lavoura pecuária (ILP) soja/ forrageira (*Urochloa hibria* cv. Mavuno) estabelecido em 2011 e, 1 (uma) área sob vegetação nativa de cerrado (mata).

A caracterização textural do solo de cada área e os teores de areia, silte e argila estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Granulometria de um Latossolo Vermelho distrófico em área sob vegetação natural e diferentes sistemas de produção em Rio Verde, Goiás, Brasil

Sistemas	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Classe textural
0,00-0,10 m				
SPD 3 anos	44,83	46,41	8,76	Argilosa
SPD 10 anos	59,30	35,18	5,53	Argilosa
ILP 9 anos	57,43	35,24	7,32	Argilosa
Veg.Nativa	64,91	29,48	5,62	Média
0,10-0,20 m				
SPD 3 anos	46,21	43,26	10,53	Argilosa
SPD 10 anos	57,41	36,22	6,38	Argilosa
ILP 9 anos	57,06	33,78	9,71	Média
Veg.Nativa	63,42	29,71	6,88	Média
0,20 – 0,40 m				
SPD 3 anos	46,30	43,99	9,71	Argilosa
SPD 10 anos	56,12	37,19	6,70	Argilosa
ILP 9 anos	57,72	34,71	7,58	Média
Veg.Nativa	60,86	25,71	13,43	Média

De acordo com a classificação de Santos et al. (2018).

Avaliações

A avaliação iniciou-se anteriormente à semeadura da soja 20/21, após cultivo de milho híbrido AG 8061 PRO 2 (safra 19/20) na área de SPD 3 e para área de SPD 10 utilizou-se o milho híbrido AG 8088 PRO 2. Já para o sistema de ILP 9, foi utilizada as *Urochloa hibrida* cv. Mavuno com pastejo, rotacionado entre 7 a 14 dias, com 20 (vinte) bezerros da raça nelore

em cada piquete de 2.930 m² com massa média de 260,4 kg por animal, o início de pastagem ocorreu 85 dias após a semeadura das *Urochloas* (26/05/2020).

Em cada área, foram delimitados 4 transectos com dimensão de 2 x 0,25 m (Figura 1) totalizando 16 unidades experimentais + 1 transecto na área de vegetação nativa, os quais foram saturados com água além da capacidade total de água disponível (CAD). Segundo a CAD realizada por Vermeiren; Jobling. (1997) in Albuquerque et al., 2010 em solo similar ao estudado, a adição de 52 litros de água em uma área de 0,30 m² é suficiente para saturar o solo até a profundidade de 0,40 m, no entanto, foi adotado um valor acima (160 litros) devido a perdas decorrentes de escoamento e diferenças entre o solo estudado e o solo pela qual a CAD foi estipulada.

Após a saturação das áreas delimitadas, no dia 19/09/2020 a RP começou a ser medida diariamente através de um penetrômetro eletrônico Falker[®] até a profundidade de 0,40 m (MOLIN et al., 2012). A mensuração da RP foi realizada durante 11 dias sempre ao mesmo horário (9-11 h). Após a medição as áreas foram cobertas visando minimizar a evaporação.

O objetivo da variação temporal foi identificar em que condições de umidade do solo, a RP passa a ser crítica e se este efeito é semelhante em diferentes sistemas de produção agrícola. Simultaneamente as medições de RP, também foram coletadas amostras para umidade do solo nas profundidades de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20- 0,40 m. A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico conforme Teixeira et al. (2017).



Figura 1 - Montagem dos transectos e saturação do solo para avaliações nos diferentes sistemas de produção em um Latossolo Vermelho distrófico em Rio Verde, Goiás, Brasil.

Posteriormente a essas avaliações, no dia 10/11/2020 após uma precipitação de 36 mm, foi realizada a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), propriedade ligada a processos dinâmicos no solo, para os pontos amostrais, foi utilizada a metodologia de campo proposta por Bagarello et al. (2004), para avaliar o impacto de sistemas de manejo na K_{sat} , denominada de condutividade hidráulica saturada do solo.

Para sua avaliação foram utilizados cilindros de PVC (0,10 m de diâmetro e 0,25 m de altura), os quais foram inseridos no solo a uma profundidade de 5 cm. A técnica consiste em aplicar um pequeno volume de água (V) na superfície de um solo confinado por um cilindro (com área de seção transversal A) inserido no solo e medir o tempo (t_a) a partir da aplicação da água até o instante em que a superfície não esteja mais coberta por água. A condutividade hidráulica saturada foi calculada por meio da Equação 1:

$$K_{sat} = \frac{\Delta\theta}{(1 - \Delta\theta)t_a} \left[\frac{D}{\Delta\theta} - \frac{D + (\frac{1}{\alpha^*})}{\Delta\theta} \ln \left(1 + \frac{(1 - \Delta\theta)D}{\Delta\theta(D + \frac{1}{\alpha^*})} \right) \right]$$

Em que,

$\Delta\theta$ = diferença entre o teor de água do solo saturado (ou porosidade total) e o teor inicial de água.

t_a = tempo de infiltração

D : altura da lâmina de água (m) no início da medição

α^* : é a relação entre K_{sat} e fluxo matricial potencial

Metodologia sugerida por Elrick e Reynolds (1992), o qual é definido por um valor constante baseado na textura e na estrutura do solo. Todas as medições foram realizadas utilizando o volume constante de 0,00033 m³, conforme proposto por Keller et al. (2012).

A diferença entre a umidade do solo saturado e a umidade inicial do solo foi determinada a partir da umidade volumétrica (TEIXEIRA et al., 2017). Com base na textura e na estrutura do solo observada para as condições em que o experimento foi conduzido, foi utilizado um valor de $\alpha^* = 12 \text{ m}^{-1}$, conforme indicações de Elrick; Reynolds (1992) e Bagarello et al. (2004).

Análise estatística

A interpretação de dados foi realizada com análises de desvio padrão separadamente para cada profundidade do solo. Adicionalmente, foi realizado um gráfico de médias diárias

para cada tratamento em relação às camadas do solo e realizada para esta relação a análise de correlação linear entre as variáveis analisadas, através do programa SIGMAPLOT.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A camada superficial (0,00 – 0,10 m), a umidade do solo, em quase todos os dias avaliados, apresentou diferença significativa, sendo que o solo sob SPD 3 apresentou maiores valores em relação aos demais sistemas de cultivo avaliados (Figura 2 A). É possível que este efeito esteja relacionado ao maior teor de argila no solo com SPD 3 (Tabela 1), favorecendo maior armazenamento de água no solo.

Nesta mesma camada, a RP foi não significativa ($p > 0,05$), com valores variando de 0,25 – 1,32 MPa entre os sistemas de cultivo (Figura 2 B). Levando-se em consideração o limite crítico máximo ideal de 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998; ASGARZADEH et al., 2011; MOURA et al., 2021), esta camada não representa impedimento físico à planta, devido ser uma região de alterações, principalmente nas operações de semeadura quando ocorre um mínimo revolvimento do solo.

Entre as áreas, a padronização de semeadura em 0,00 – 0,10 m, não possibilitou detectar diferenças da RP entre sistemas nesta camada. Estas operações de semeadura, quando realizadas inadequadamente, pode vir a perturbar a dinâmica e a geometria porosa do solo, proporcionando menor retenção de água na camada de 0,10 m devido à redução de microporos da camada superficial (GAO et al., 2017; GALDOS et al., 2019).

Na camada entre 0,10 – 0,20 m, os valores de umidade do solo e RP foram estatisticamente diferentes, sendo que foi possível observar valores de umidade variando de 0,21 – 0,17; 0,17 – 0,13 e 0,17 – 0,12 g kg⁻¹ nas áreas de SPD 3, SPD 10 e ILP 9, respectivamente (Figura 2 C).

Para RP, somente a área de SPD 3 apresentou valor abaixo do limite crítico, porém, somente até o 4º dia de avaliação. Enquanto nos demais dias avaliados, foram acima de 2,0 MPa em todas as áreas (Figura 2 D). De acordo com Nunes et al. (2015), a camada do solo com maior sensibilidade de compactação é de até 0,20 m em sistemas de plantio direto.

O menor valor de RP do solo de 1,65 MPa foi na área SPD 3 em relação ao SPD 10 e o ILP 9 com 2,48 e 2,69 MPa, respectivamente (Figura 2 D). Os baixos valores de RP do solo

no SPD 3, para esta camada, estão associados a maior umidade do solo, cuja correlação foi significativa e negativa (0,76) com a umidade do solo ($p < 0,01$) (Figura 4 A).

Na camada 0,20 - 0,40 m não houve diferença significativa ($p > 0,05$) da RP do solo entre as áreas avaliadas, porém, todas apresentaram valores de RP acima de 2,0 MPa, indicando adensamento prejudicial (Figura 2 F).

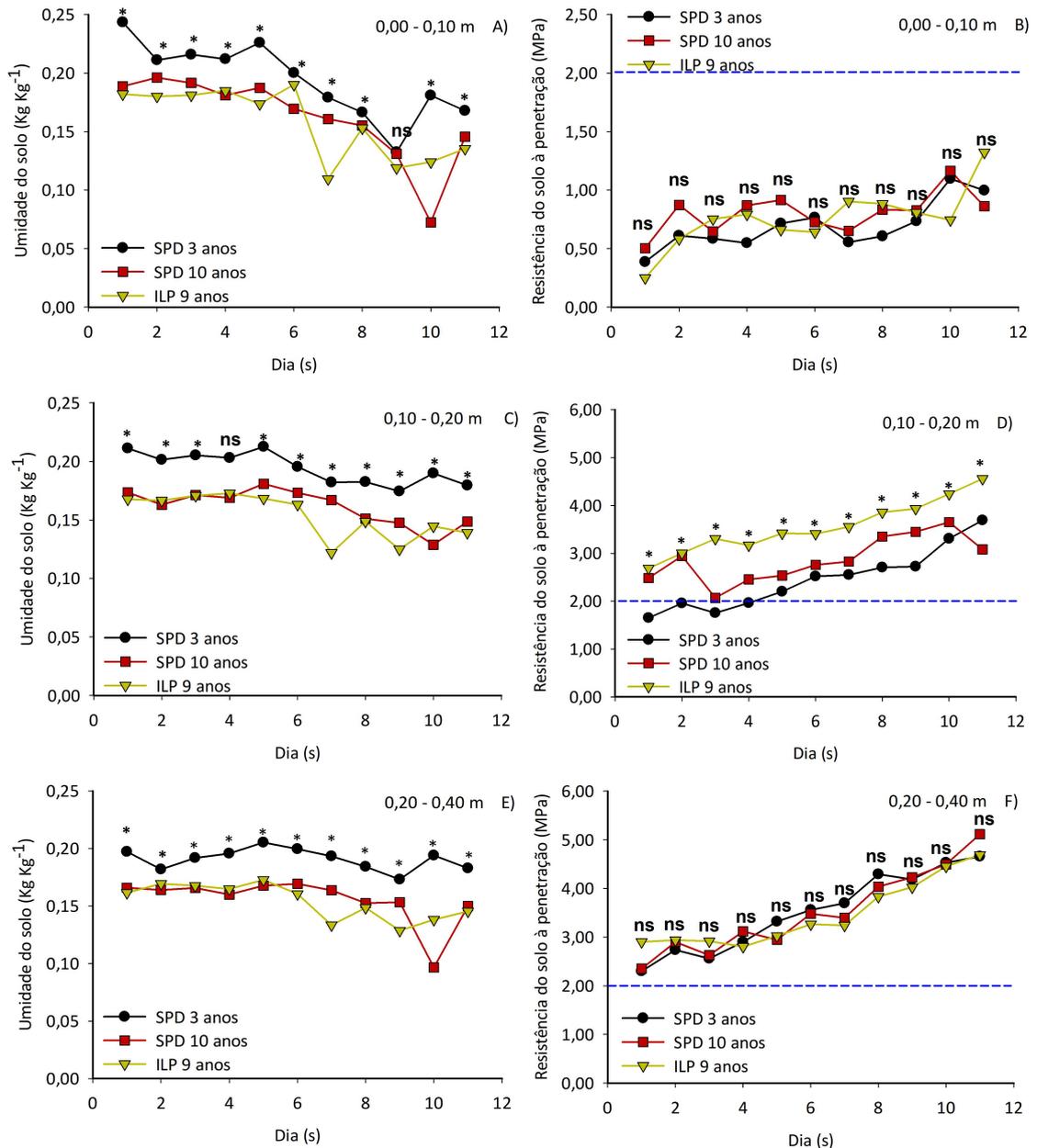


Figura 2 - Variação temporal da resistência à penetração e umidade do solo em áreas agrícolas sob sistema de plantio direto com 3 e 10 anos de estabelecimento (SPD 3, SPD 10) e integração lavoura-pecuária com 9 anos (ILP 9) avaliados nas camadas 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40 m.

*: significativo ($p < 0,05$), ns: não significativo ($p > 0,05$). A linha tracejada indica o limite máximo de RP desejável para o solo.

No geral, quando são comparadas as profundidades de avaliação do solo em cada sistema, foi possível observar que a camada 0,00 – 0,10 m apresentou menores valores de RP quando comparado as demais camadas 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m (Figura 3).

Avaliando os sistemas SPD 3 e SPD 10, foi possível observar maior distinção da RP entre camadas (Figura 3 B, D) enquanto no ILP 9, as camadas 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m apresentaram efeito da RP de forma mais homogênea (Figura 3 F), o que pode ser um efeito benéfico sob o ponto de vista de padronização da infiltração de água no perfil de solo neste ambiente.

Segundo Galdos et al. (2020) as *Urochloas*, utilizadas em ILP possuem em sua estrutura, uma rede significativa de raízes finas, promovendo ao solo maior macroporosidade e maior complexidade e conectividade na rede de poros podendo ser um aspecto positivo de uniformidade da estrutura do solo.

A resistência à penetração apresentou correlação significativa ($p < 0,05$) com a umidade do solo em todas as áreas avaliadas, sendo que na área de SPD 3, essa relação foi percebida na camada de 0,10 – 0,20 m. Já para o SPD 10, a relação foi significativa em todas as camadas (Figura 4 B) e para o ILP 9, nas camadas de 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m (Figura 4 C). Paralelamente, para a área com vegetação nativa, a relação entre os dois atributos foi significativa para a camada de 0,20 – 0,40 m. (Figura 4 D).

Na área SPD 3, a RP apresentou valores na camada 0,10 – 0,20 m, variando de 1,65 – 3,69 MPa, sendo que quando a RP atingiu valor máximo de 3,69 MPa, a umidade do solo foi de 0,18 g kg⁻¹ (Figura 4 A). Segundo Peixoto et al. (2019) em Latossolos de textura argilosa áreas com SPD, a RP > 2,0 MPa pode configurar em situação crítica para o desenvolvimento das culturas, restringindo em 60% o alongamento radicular, e quando atinge valores 3,6 MPa, pode comprometer mais a raiz em 95% de alongamento radicular.

Levando-se em consideração o valor de RP de 2,0 MPa como limite máximo para o bom desenvolvimento da planta, no SPD 3 para a camada 0,10 – 0,20 m, a umidade seria de 0,20 g Kg⁻¹. Em outra abordagem, este valor de umidade pode indicar as condições de umidade ideal para tráfego de máquinas baseado nos limites de Atterberg que definem a consistência do solo nas faixas de tenacidade (<0,20 kg kg⁻¹), friabilidade (0,20-0,34 kg kg⁻¹) e plasticidade (0,34-0,42 kg kg⁻¹). Assim, no limite de 2,0 MPa, a umidade de 0,20 g Kg⁻¹ estaria com consistência friável, cuja condição apresenta melhores condições de trafegabilidade, com maior resistência do solo à compactação (WEBER et al., 2021).

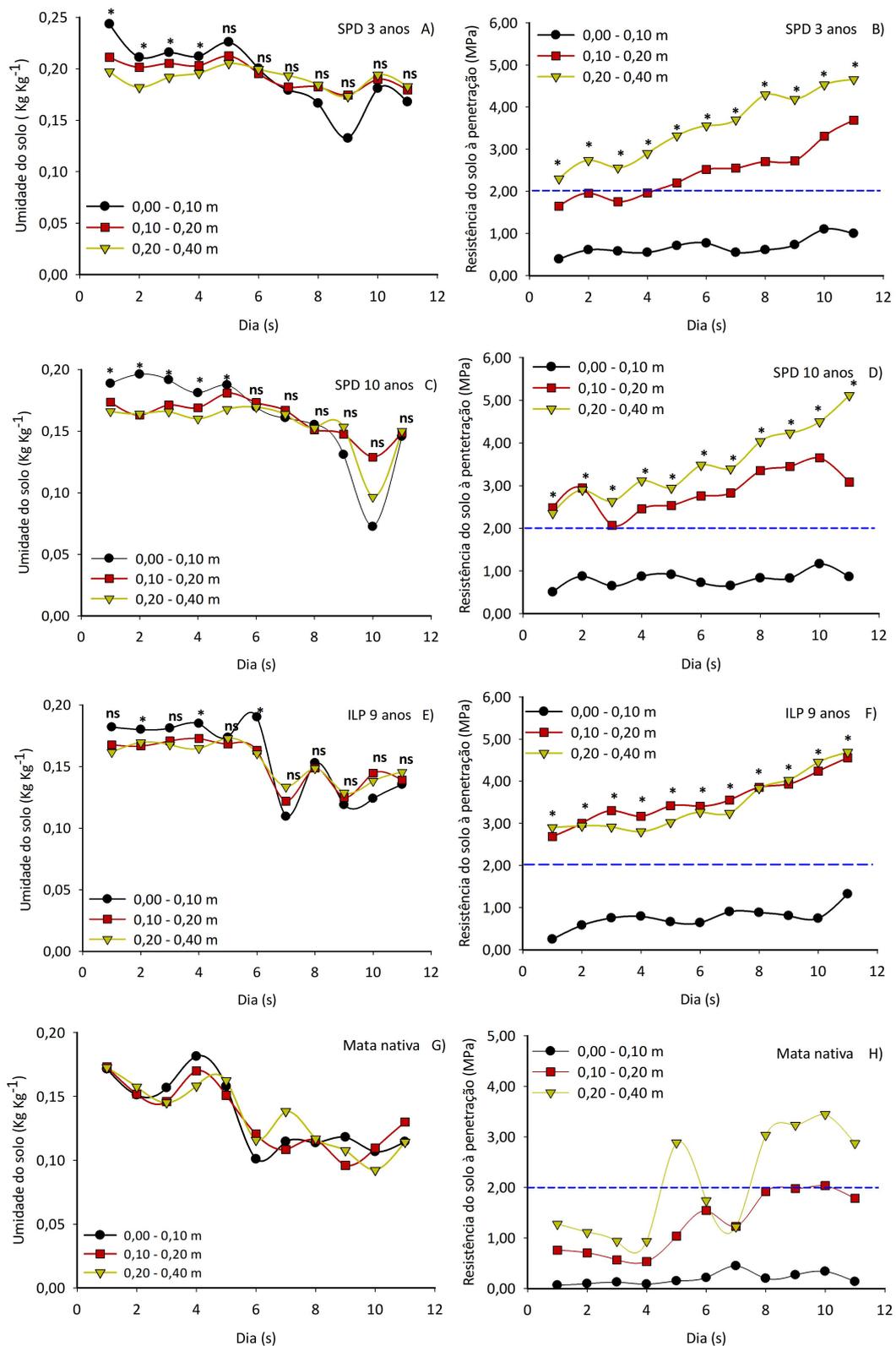


Figura 3 - Efeito comparativo das camadas do solo para a resistência do solo à penetração e umidade do solo em diferentes sistemas de cultivo e mata nativa no Cerrado.

*: significativo ($p < 0,05$), ns: não significativo ($p > 0,05$). A linha tracejada indica o limite máximo de RP desejável para o solo.

Para SPD 10 (Figura 4 B), apesar de significativa a correlação entre RP e umidade na camada 0,00 – 0,10 m, a RP foi menor que 2,0 MPa (Figura 4 B), não representando situação de adensamento prejudicial do solo. Porém, para 0,10 - 0,20 m na área de SPD 10, para valor de RP de 2 MPa, a umidade indicativa para manejo de solo seria de 0,19 Kg Kg⁻¹, enquanto para 0,20 – 0,40 m de 0,21 Kg Kg⁻¹ (Figura 4 B).

Para o ILP 9 na camada 0,10 – 0,20 m, o valor de umidade baseado na RP de 2 MPa, seria de 0,23 Kg Kg⁻¹ (Figura 4 C). De acordo com Cecagno et al. (2016), problemas de compactação do solo em sistemas de ILP, quando houver, restringem-se geralmente a camada de 0,05 – 0,10 m de profundidade do solo.

No entanto, de acordo com Reis et al. (2019) a camada do solo onde se há maior desenvolvimento radicular das culturas anuais de grãos, é a camada de 0,10 – 0,20 m, ou seja, há necessidade de monitoramento do solo para que o nível crítico de RP não seja alcançado e limite as operações de manejo e/ou restrinja o crescimento radicular. Enquanto na camada de 0,20 - 0,40 m a umidade ideal para tráfego de máquinas sobre o solo seria de 0,20 Kg Kg⁻¹.

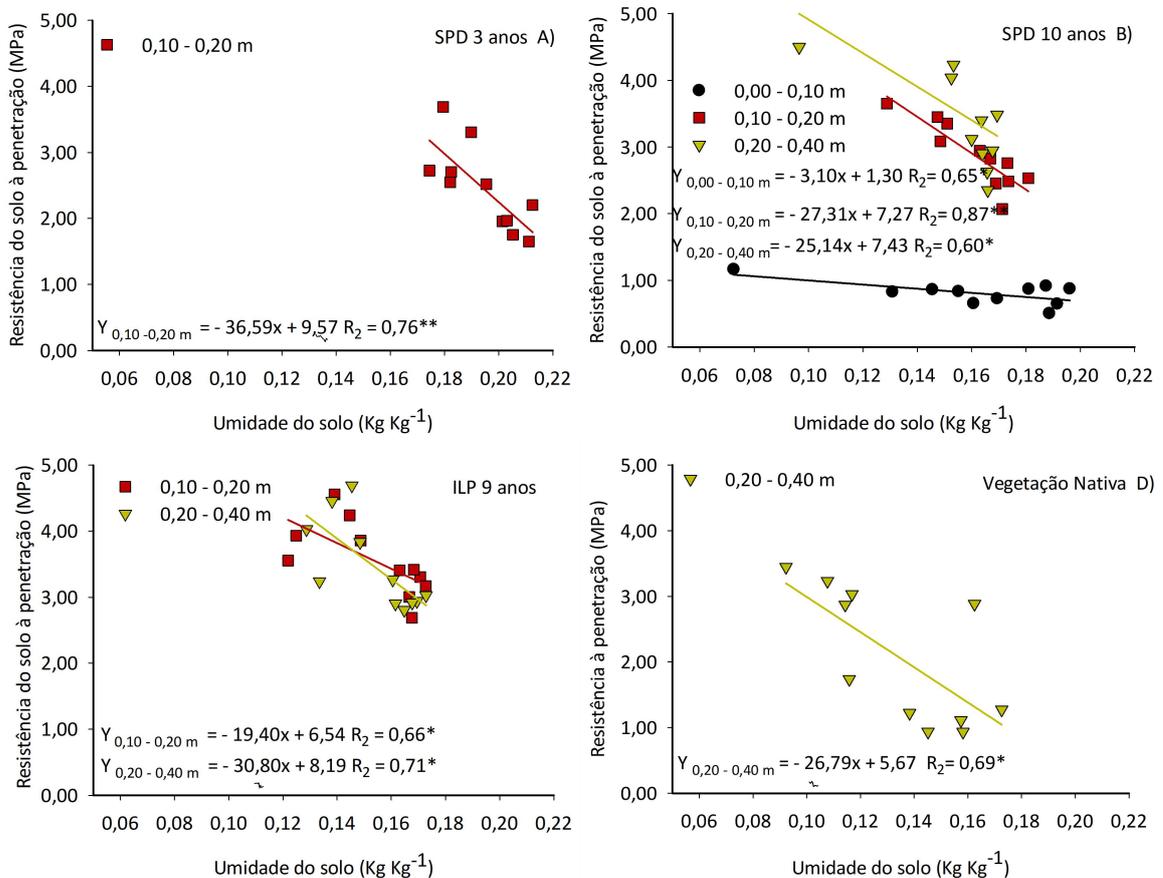


Figura 4 - Análise de correlação entre resistência do solo à penetração em diferentes sistemas de cultivo no Cerrado.

Apesar de o estudo estar comparando, nenhum dos sistemas se aproximou mais da vegetação natural, possivelmente por não terem iniciado ainda sua fase de estabilização, de acordo com Altman et al., (2010) no período entre 10 – 20 anos, o SPD entra na fase de estabilização das propriedades do solo, porém, antes deste período, o solo encontra-se em constante adaptação e reestruturação.

Os dados de condutividade hidráulica (Figura 5) mostraram diferenças entre os solos sob SPD 10 e ILP 9 com maior condutividade hidráulica no ILP 9. Balbinot Junior et al. (2017) preconiza que forrageiras pertencentes ao gênero *Urochloa* utilizadas em ILP podem efetivamente estimular a estruturação dos perfis de solo, principalmente em regiões tropicais e subtropicais que tem predominância do uso do SPD.

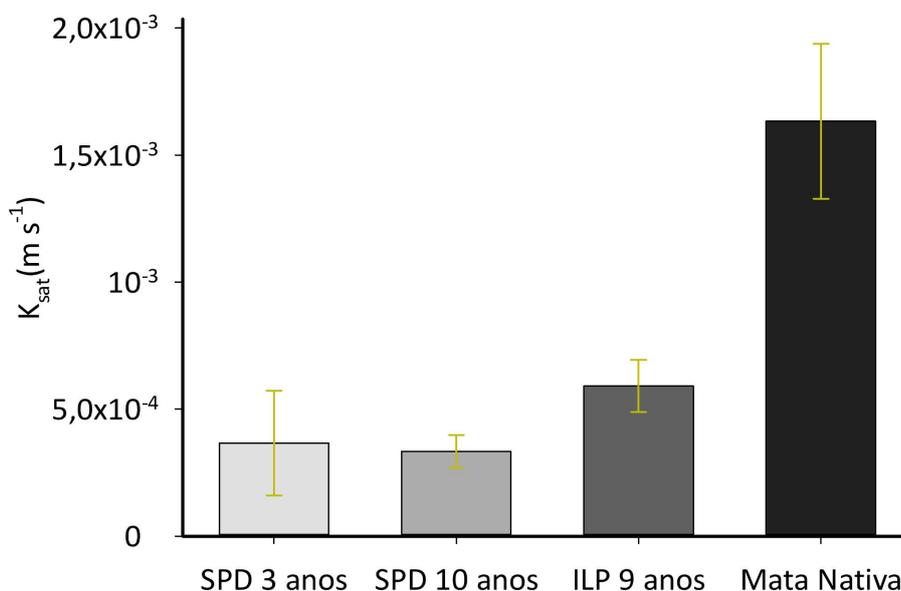


Figura 5 - Efeito de sistemas de produção agrícola e histórico de instalação na condutividade hidráulica em Latossolo Vermelho em Rio Verde - GO.

Quando comparados os sistemas para atributos físicos do solo, Salton et al. (2014) encontraram maior estabilidade de agregados no solo em sistema com o pastoreio de gado (ILP), o qual obteve um diâmetro médio ponderado de agregados significativamente maior, aproximadamente 20%, em comparação com SPD, resultado em maior drenagem pelo solo de ILP, aumentando assim sua condutividade hidráulica.

Também é percebido que o solo de vegetação nativa dispõe de índices superiores de condutividade hidráulica sobre os outros sistemas (Figura 5), possivelmente esse comportamento se desenvolve devido à disposição de maior uniformidade de perfil, com

macro e microporos em equilíbrio, adicionalmente, seu sistema radicular é profundo, proporcionando maior interação física em camadas mais profundas do solo (SOARES et al., 2021).

4 CONCLUSÃO

A menor resistência do solo à penetração está na área com três anos em plantio direto.

A resistência do solo à penetração tem correlação negativa com a umidade do solo.

Há distinção da resistência do solo à penetração entre camadas do solo em SPD e ILP.

Quando se estabelece a resistência do solo à penetração crítica de 2,0 MPa, todos os sistemas apresentam valores abaixo desse limite, os quais possibilitam condições adequadas para o desenvolvimento das plantas.

A condutividade hidráulica apresenta diferença entre os solos em SPD e ILP.

A *Urochloa* utilizada em ILP pode efetivamente estimular a estruturação dos perfis de solo.

REFERÊNCIAS

ALTMANN, N. **Plantio Direto no Cerrado: 25 anos acreditando no sistema**. Passo Fundo: Ed. Aldeia Norte, 2010. 568p.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M. R.; MAHBOUBI, A. A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A. R. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 34-42, 2011. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.06.009

BAGARELLO, V., IOVINO, M., ELRICK, D., A simplified falling-head technique for rapid determination of fieldsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 1, p. 66-73, 2004. DOI: 10.2136/sssaj2004.6600

BALBINOT JUNIOR, A. A.; SANTOS, J. C. F.; DEBIASI, H.; YOKOYAMA, A. H. Contribuição de raízes e parte aérea de espécies de brachiaria no desempenho em sucessão da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 8, p. 592-598, 2017. DOI: 10.1590/S0100-204X2017000800004

BENEVENUTE, P. A. N.; MORAIS, E. G.; SOUZA, A. A.; VASQUES, I. C. F.; CARDOSO, D. P.; SALES, F. R.; SEVERIANO, E. C.; HOMEM, G. C. B.; CASAGRANDE, D. R.; SILVA, B. M. Penetration resistance: An effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. **Ecological Indicators**, v. 117, n. 1, e106647, 2020. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106647

BÜCHI, L.; WENDLING, M.; AMOSSÉ, C.; NECPALOVA, M.; CHARLES, R. Importance of cover crops in alleviating negative effects of reduced soil tillage and promoting soil fertility in a winter wheat cropping system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 256, n. 1, p. 92-104, 2018. DOI: 10.1016/j.agee.2018.01.005

CECAGNO, D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONIA, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINSA, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI, F.; FINKA, J. R.; CARVALHO, P. C. F. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v. 156, n. 1, p. 54-62, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.10.005

EHLERS, W.; KÖPKE, U.; HESSE, F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, v. 3, n. 3, p. 261-275, 1983. DOI: 10.1016/0167-1987(83)90027-2

ELRICK, D.; REYNOLDS, W. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 1, p. 320-323, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600010052x

FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Least limiting water range and critical bulk density values as recovery indicators of a soil under forest and pasture systems. **Ciência florestal**, v. 31, n. 2, p. 658-682, 2021. DOI: 10.5902/1980509833474

FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, C. M.; GUARCONI, R. C.; BALBINO, J. M. S. Crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico. **Solos e Nutrição de Plantas**, v. 75, n. 4, p. 497-506, 2016. DOI: 10.1590/1678-4499.549.

FRANCZISKOWSKI, M. A.; SEIDEL, E. P.; FEY, E.; ANSCHAU, K. A.; MOTTIN, M. C. Propriedades físicas do solo no sistema de plantio direto e preparo reduzido, cultivado com plantas de cobertura. **Engenharia na agricultura**, v. 27, n. 6, p. 556-564, 2019. DOI: 10.13083/reveng.v27i6.966

GALDOS, M. V.; BROWN, E.; ROSOLEM, C. A.; PIRES, L. F.; HALLETT, P. D.; MOONEY, S. J. Brachiaria species influence nitrate transport in soil by modifying soil structure with their root system. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, e5072, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-61986-0

GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, M.; CALONEGO, J. C. ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v. 337, n. 1, p. 1126-1135, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.11.031

GAO, L.; BECKER, E.; LIANG, G.; HOUSSOU, A. A.; WU, H.; WU, X.; CAI, D.; DEGRÉ, A. Efeito de diferentes sistemas de preparo do solo na estrutura agregada e distribuição interna de carbono orgânico. **Geoderma**, v. 288, n. 1, p. 97-104, 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.11.005

KELLER, T.; SUTTER, J. A.; NISSEN, K.; RYDBERG, T. Using field measurement of saturated soil hydraulic conductivity to detect low-yielding zones in three Swedish fields. **Soil and Tillage Research.**, v. 124, n. 1, p. 68 - 77, 2012. DOI: 10.1016/j.still.2012.05.002

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, v. 88, n. 1, p. 279-285, 2006. DOI: 10.1016/j.still.2005.06.014

LOPES SOBRINHO, O. P.; SANTOS, L. N. S.; SANTOS, G. O.; CUNHA, F. N.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B. Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. 2, p. 19-33, 2020. DOI: 0.5380/abclima.v27i0.68692

LUZ, F. B.; SILVA, V. R.; MALLMANN, F. J. K.; PIRES, C. A. B.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CHERUBIN, M. R. Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 281, n. 1, p. 100-110, 2019. DOI:10.1016/j.agee.2019.05.006

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. D.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 584-590, 2012. DOI: 10.1590 / S1415-43662012000500015

MOURA, M. S.; SILVA, B. M.; MOTA, P. K.; BORGHI, E.; RESENDE, A. V.; ACUÑA-GUZMAN, S. F.; ARAÚJO, G. S. S.; LUCAS DE CASTRO MOREIRA DA SILVA, L. C. M.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. **Agricultural Water Management**, v. 243, n. 1, e106523, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106523

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 288-298, 2014. DOI: 10.1590/S0100-06832014000100029

NOTARIS, C.; JENSEN, J. L.; OLESEN, J. E.; SILVA, T. S.; RASMUSSEN, J. PANAGEA, L. RUBÆK, G. H. Long-term soil quality effects of soil and crop management in organic and conventional arable cropping systems. **Geoderma**, v. 403, n. 1, e115383, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115383

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F.S. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, n. 1, p. 119-126, 2015. DOI: 10.1016/j.still.2014.12.007

PEIXOTO, D. S.; SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; MOREIRA, S. G.; SILVA, F.; CURI, N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 1, e104307, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2019.104307

PIAZZA, G.; PELLEGRINO, E.; MOSCATELLI, M. C.; ERCOLI, L. Long-term conservation tillage and nitrogen fertilization effects on soil aggregate distribution, nutrient stocks, and enzymatic activities in bulk soil and occluded microaggregates. **Soil and Tillage Research**, v. 196, n. 1, e104482, 2020. DOI: 10.1016/j.still.2019.104482

REIS, A. M. H.; ARMINDO, R.; PIRES, L. Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. 1, e104294, 2019. DOI: 10.1016 / j.still.2019.104294

SALTON, J. C.; FABIO M. MERCANTE, F. M.; TOMAZI, M.; ZANATTA, J. A.; CONCEN, G.; SILVA, W. M.; RETORE, M. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, n. 1, p. 70-79, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2013.09.023

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. 355p.

SILVA, M. F.; FERNANDES, M. M. H.; FERNANDES, C.; SILVA, A. M. R.; FERRAUDO, A. S.; COELHO, A. P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, v. 209, n. 1, e104924, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104924

SOARES, M. D. R.; SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, R. B.; ESTEBAN, D. A. A.; NORONHA, R. L.; GOMES, M. G. S.; DA CUNHA, J. M. Mudança no uso da terra e seu impacto nas propriedades físicas e mecânicas da Terra Negra Arqueológica na Floresta Amazônica. **Catena**, v. 202, n. 1, e105266, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105266

SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A. P. F.; ALMEIDA, A. Q.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. **Soil and Tillage Research**, v. 205, n. 1, e104768, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104768

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Characterization of the least limiting water range of an oxisol under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 573-581, 1998. DOI: 10.1590/S0100-06831998000400002

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação Localizada**. Roma: FAO, 1997. 184p.

VIZIOLI, B.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; TORMENA, C. A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 209, n. 1, e104935, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2021.104935

WEBER, L. L.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; ZIMMERMANN, G. G.;
GUEDES FILHO, O.; TORMENA, C. A.; KELLER, T.; JASPER, S. P. Impact of
Self-Propelled Sprayer Traffic on Ferralsol Physical Properties in Southern Brazil. **Journal of
Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, n. 4, p. 2957-2966, 2021. DOI: 10.1007/s42729-
021-00581-2

CAPÍTULO 2

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO CERRADO

RESUMO

A qualidade física do solo varia de acordo com o tipo de solo e o manejo agrícola adotado. Assim, este trabalho foi realizado com o objetivo de identificar atributos físicos de conservação do solo em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa em sistemas de plantio direto (SPD) e integração lavoura pecuária (ILP), usando uma área de vegetação natural como referência de conservação de solo. Foram avaliados 6 sistemas e uma vegetação natural como referência, sendo eles: duas áreas com SPD, quatro com ILP, estabelecidas em anos distintos e uma área de vegetação nativa de Cerrado. Todos os sistemas utilizaram a soja (*Glycine max*) na safra. Os SPD com 4 e 11 anos de estabelecimento utilizaram o milho (*Zea mays*) como safrinha, já para os sistemas de ILP, foram utilizadas áreas com forrageiras *Urochloa híbrida cv. Mavuno* e *Urochloa híbrida cv. Mulato* com pastejo em anos distintos de produção (5 e 11 anos) para ambas as cultivares. Foram realizadas avaliações de solo nas profundidades de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40 e 0,40 – 0,60 m com 4 repetições por área, sendo estas: densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, resistência do solo à penetração, umidade gravimétrica, porosidade de aeração, diâmetro médio ponderado de agregados, carbono orgânico e diagnóstico rápido da estrutura do solo. Para interpretação de dados realizou-se a análise de variância separadamente, para cada profundidade do solo, aplicando o teste de comparação de médias de Tukey a 5% de probabilidade, adicionalmente foi realizada a análise de componentes principais e a análise de “Cluster”. Diante do apresentado conclui-se que o sistema que apresentou, no geral melhor qualidade física do solo foi a ILP de 5 anos com *Urochloa híbrida cv. Mulato*, possivelmente por não ter entrado no processo de estabelecimento do sistema e estar em pleno desenvolvimento estrutural. Quando avaliado o tempo de adoção dos ILP, foi possível observar valores menores de resistência do solo à penetração, nos manejos com histórico de implementação mais recentes em comparação aos mais antigos. Foi possível observar similaridade entre sistemas de produção agrícola para os sistemas com menor e maior histórico de implantação, na camada superior do solo.

Palavras-chave: Integração lavoura pecuária, milho, plantio direto, *Urochloa*.

CHAPTER 2

SOIL PHYSICAL QUALITY IN AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS IN THE CERRADO

ABSTRACT

Soil physical quality varies according to soil type and agricultural management adopted. Thus, the objective of this work was to evaluate the physical attributes of a dystrophic oxisol of bulked texture under systems of no-tillage (NT) and crop livestock integration (CLI), using a natural vegetation area as a reference of soil conservation. four with CLI, established in different years and an area under native Cerrado vegetation (forest). All systems used soybean (*Glycine max*) in the crop. The NT with 4 and 11 years of establishment used corn (*Zea mays*) as interim harvest, the for the CLI systems, were used areas with *forage Urochloa hybrid cv. Mavuno* and *Urochloa hybrid cv. Mulato* with grazing in different years of production (5 and 11 years) for both cultivars. Soil evaluations were performed at depths of 0.00 – 0.10; 0.10 – 0.20; 0.20 – 0.40 and 0.40 – 0.60 m with 4 replications per area, which are: soil density, total porosity, macro and microporosity, soil resistance to penetration, gravimetric moisture, aeration porosity, weighted average aggregate diameter, organic carbon, and rapid diagnosis of soil structure. For data interpretation, variance analysis was performed separately for each soil depth, applying the Tukey mean comparison test at 5% probability, additionally the principal component analysis and cluster analysis were performed. In view of the presented conclusion that the system that presented, in general, the best physical quality of the soil was the CLI of 5 years with *Urochloa hybrid cv. Mulatto*, possibly for not having entered the process of establishing the system and being in full structural development. When the time of adoption of the CLI was evaluated, it was possible to observe lower soil penetration resistance values in the managements with a history of more recent implementation compared to the older ones. It was possible to observe similarity between agricultural production systems for the systems with lower and longer history of implantation, in the upper soil layer.

Keywords: Crop livestock Integration, corn, no-tillage, *Urochloa*.

1 INTRODUÇÃO

A necessidade do uso de implementos agrícolas, durante o estabelecimento das culturas é fator indispensável, entretanto, quando empregados de maneira inadequada, alguns aspectos físicos do solo, como, densidade e macroporosidade são alterados. Propriedades químicas e biológicas também são afetadas pelos impactos negativos de práticas excessivas (BELANGER et al., 2017; BONINI et al., 2018).

Sistemas conservacionistas como sistema de plantio direto (SPD) e Integração Lavoura Pecuária (ILP), são práticas que preconizam o menor revolvimento do solo, adição de palhada, importante aliada no manejo e conservação do sistema. Solos submetidos ao SPD, apresentam maior estruturação do solo quando comparado à manejos convencionais, melhorando o índice de agregação, elevando a porosidade, além de propiciarem boas condições para o desenvolvimento radicular (SILVA et al., 2021).

Solos de textura argilosa, com constante cobertura vegetal, aumentam a porosidade, a conectividade do sistema de poros e a permeabilidade (BACQ-LABREUIL et al., 2018). Este comportamento aliado a utilização adequada do manejo de plantas de grande aporte de massa seca e com a rotação de culturas, beneficiam o sistema como um todo.

De acordo com Cândido et al. (2015) e Mota et al. (2015), a massa seca predispõe a matéria orgânica que floclula o solo, expandindo os espaços porosos e minimizando o efeito da compactação, além de aumentar a elasticidade do solo. O material vegetal seco gera uma ampla capacidade de recuperar a característica comum do solo após a deformação por aplicação de uma força.

Em estudos de Pires et al. (2017) e Galdos et al. (2019), foi constatado que o SPD a longo prazo (30 anos) aumenta a macroporosidade e a conectividade de poros, propiciando a ciclagem de nutrientes, o crescimento de raízes, o fluxo de gases no solo e a dinâmica de água. Neste mesmo contexto, a fim de incrementar mais massa seca ao solo, durante toda a entressafra, tem-se buscados sistemas de cultivo como ILP.

Dentro do ILP, são utilizadas diferentes espécies de forrageiras. Poaceas do gênero *Urochloa* apresentam alta relação C/N principalmente as da espécie *U. brizantha* que são as mais utilizadas nesses sistemas, promovendo maior tempo de permanência sobre o solo com liberação mais gradativa de nutrientes e acúmulo de carbono através da decomposição gradativa da massa seca (BLANCO-CANQUI; JASA et al., 2019).

O ILP quando bem manejado torna a pressão estimulada pelo pisoteio animal irrelevante ao solo, pastejos com altura do pasto de 30 cm de azevém italiano e aveia preta, por exemplo, favorecem o aumento da taxa de infiltração de água em culturas sucessoras a forragem, em razão das melhorias que são proporcionadas as propriedades físicas do solo, diminuindo a densidade aparente do solo e aumentando a macroporosidade (BONETTI et al., 2019).

Em suma, tanto o SPD (sucessão) quanto o ILP são sistemas que preconizam a qualidade do solo, tendo como parâmetro de conservação a mata nativa. Segundo Soares et al. (2021), a mata dispõe de maior uniformidade de perfil de solo, com macro e microporos em equilíbrio, sistema radicular profundo, exercendo maior interação física no perfil do solo.

Nesta perspectiva o objetivo desse trabalho foi identificar atributos físicos de conservação do solo em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa em sistemas de plantio direto (SPD) e integração lavoura pecuária (ILP), usando uma área de vegetação natural como referência de conservação de solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Área Experimental

O experimento foi conduzido no Instituto de Ciência e Tecnologia Comigo (ITC), em Rio Verde - GO. O clima é classificado em B4 rB'4a' (úmido, pequena deficiência hídrica, mesotérmico e evapotranspiração no verão menor que 48%) de acordo com Köppen (LOPES SOBRINHO et al., 2020).

As áreas utilizadas para o experimento encontram-se próximas, nas coordenadas 17° 45' 48'' S e 51° 02' 14'' W, com altitude de 832 m. O solo em estudo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS et al., 2018), de textura argilosa contendo 57% areia, entre 38% de argila e 5% de silte. A caracterização química do solo encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico em área com diferentes sistemas de produção, em Rio Verde, Goiás, Brasil

pH CaCl ₂	Cacmol _c dm ⁻³	Mgmg dm ⁻³	Al	Kmg dm ⁻³	P	V %
5,2	2,6	0,86	0	95,8	15,25	53,8

Foi distribuído, em todas as áreas avaliadas, 2 t ha⁻¹ de calcário (PRNT 74%). A adubação de semeadura foi realizada, no sulco com 200 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl) e 100 kg ha⁻¹ de FTE BR 12 (3,9% de S, 1,8% de B, 0,8% de Cu, 2,0 % de Mn e 9,0% de Zn) e 20 kg ha⁻¹ de Sulfogran (90% de S). A adubação de semeadura foi realizada com 250 kg ha⁻¹ de Fosfato Monoamônio (MAP) no sulco.

Tratamentos

Os tratamentos avaliados constam de áreas com diferentes sistemas de produção agrícola, sendo duas áreas com o sistema de plantio direto (SPD) sucessão soja (*Glycine max*) / milho (*Zea mays*) instaladas em 2010 e 2018 e quatro áreas com o sistema integração lavoura pecuária (ILP) sucessão soja / forrageira, compostas por 2 áreas com *Urochloa híbrida* cv. Mavuno instaladas em 2011 e 2016 e duas áreas com *Urochloa híbrida* cv. Mulato instaladas em 2011 e 2016, além das áreas agrícolas também foi avaliado uma área sob vegetação nativa de Cerrado (mata).

Amostragens

As avaliações iniciaram em outubro, após cultivo de milho híbrido AG 8061 PRO 2 (safra 20/21) na área de SPD 3 e para área de SPD 10 utilizou-se o milho híbrido AG 8088 PRO 2. Já para os sistemas de ILP, as áreas foram utilizadas com as forrageiras instaladas e após o pastejo rotacionado, entre 7 a 14 dias, com 20 bezerros da raça nelore em cada piquete de 2.930 m², com massa média de 260,4 kg por animal.

O início de pastagem ocorreu no dia 26 de maio de 2021, 85 dias após a semeadura das *Urochloas* e as amostragens de solo foram realizadas no dia 07 de outubro 2021 após uma precipitação de 79 mm, ocorrida no dia 02 de outubro de 2021 com 4 repetições por área.

As amostras indeformadas e deformadas do solo, foram coletadas até a profundidade de 0,60 m, através de 4 mini-trincheiras abertas em cada sistema, com dimensões de 0,40 x 0,30 x 0,80 m de largura, comprimento e profundidade respectivamente, subdividindo em camadas de 0,00 - 0,10; 0,10 -0,20; 0,20 - 0,40 e 0,40 – 0,60 m.

As amostras indeformadas foram coletadas nas trincheiras com auxílio de cilindros de aço de 100 cm³. Ao redor das trincheiras foram coletadas amostras deformadas com auxílio de um trado holandês.

Avaliações

A densidade aparente do solo (Ds), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) foram determinadas de acordo com as metodologias descritas por Teixeira et al. (2017).

A densidade foi calculada pela relação entre a massa do solo a 105 °C e o volume total da amostra do solo. A microporosidade (poros com diâmetro entre 0,0002 e 0,05 mm) foi

determinada pelo volume de água retido nas amostras de solo, submetidas a potenciais matriciais de -6 KPa. A macroporosidade (poros com diâmetro maior que 0,05 mm) foi calculada pela subtração da Porosidade Total (Pt) em relação a Mi.

A Pt foi determinada com base no volume de poros do solo, assumindo a densidade da água igual a 1.000 kg m⁻³ e a massa de água obtida pela diferença do solo saturado e do solo seco em estufa, por pesagem em balança semi-analítica, igual a seu volume, podendo, assim, ser dividida.

A resistência do solo à penetração foi aferida em campo através de um penetrômetro eletrônico Falker®, até a profundidade de 0,40 m (MOLIN et al., 2012). Também foram coletadas amostras para umidade do solo nas profundidades de 0,00 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,40; 0,40 – 0,60 m. A umidade do solo foi determinada pelo método gravimétrico conforme Teixeira et al. (2017).

Adicionalmente foi realizado o cálculo de Porosidade de aeração (PA) em potencial de capacidade de campo (CC), a qual permite averiguar o volume de poros do solo vazios de água (KLEIN, 2012), seguindo a equação 01:

Eq.: 1

$$PA = Pt - Uv$$

Sendo,

PA = Porosidade de aeração (m³ m⁻³)

Pt = Porosidade total (m³ m⁻³)

Uv = Umidade volumétrica (m³ m⁻³)

Para a realização do cálculo de Porosidade de aeração foi calculada a umidade volumétrica, a qual é produto da multiplicação da Ds pela umidade do solo (umidade gravimétrica).

O diâmetro médio de agregados do solo (DMP) foi determinado usando método de peneiramento proposto por Kemper; Chepil (1965). Para este método, ainda em campo foram realizados um pré peneiramento para cada amostra obtida, utilizando um conjunto de peneira com malhas de 8 e 4 mm, devendo ser considerado apenas a subamostra que ficar retida na peneira de 4 mm.

Já em laboratório, os agregados foram pré umedecidos por capilaridade por um período de 10 min, com posterior submissão a peneiramento úmido (25 min) através de

peneiras com malha de 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm. O solo retido em cada peneira foi seco em estufa por 24h, possibilitando a quantificação do DMP que é uma estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados (BEATA, 2004).

O carbono orgânico do solo (Corg), foi determinado conforme o método de Sims; Haby (1971), cujo princípio é a oxidação da matéria orgânica em via úmida com dicromato de potássio em meio fortemente ácido (H₂SO₄). Os resultados foram calculados utilizando-se uma curva padrão com solução de sacarose 7%.

Também foi realizado o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), na camada entre 0 - 0,25 m. A análise foi feita conforme a metodologia proposta por Ralisch et al. (2017), que preconiza a avaliação em amostras de blocos de solo preservando a estrutura o mais próximo da condição original do solo a campo.

Foi estipulada uma nota DRES por camada e anotada a profundidade de cada camada seguindo os critérios da carta de campo do DRES que considera o tamanho de agregados. Com estes dados, foi possível obter a nota média da amostra, conforme equação 2:

Eq 2.:

$$IQEA = \frac{(E_{c1} \times Qe_{c1}) + (E_{c2} \times Qe_{c2})}{E_{total}}$$

Onde,

$IQEA$ = Índice de qualidade estrutural da amostra

E_c = Espessura da camada (cm)

Qe_c = Nota de qualidade estrutural atribuída a cada camada

E_{total} = Espessura por profundidade total da amostra (25 cm)

Análises estatísticas

Na interpretação de dados, realizou-se a análise de variância e, para comparação de médias, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o software Sisvar (FERREIRA et al., 2019) separadamente para cada profundidade do solo.

A ACP foi aplicada padronizando-se as unidades dos atributos com média igual a 0 e variância igual a 1 (KAISER, 1958). A qual foi utilizada para explicar a estrutura da variância dos dados de solos por meio de correlações lineares das variáveis avaliadas com os componentes principais (CP) (JOHNSON; WICHERN, 2002; HAIR et al., 2005), cujo objetivo é identificar, em um conjunto de dados, uma variável que seja a capaz de explicar

parte significativa da variância, através de correlações lineares (MINGOTI, 2005; FERREIRA, 2008). O programa estatístico utilizado para ACP foi o Statistica 7.0 (Stat Soft®).

Com a finalidade de avaliar como as determinações dos manejos se agrupavam, bem como sua correlação com o grupo estatístico que integra, foi realizada a análise de “Cluster”. Pela análise de dados não pareados, foram verificadas as tendências médias entre as determinações dos manejos, possibilitando avaliar qual o comportamento de uma avaliação em relação à outra (JONGMAN, 1995).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na camada de 0,00 – 0,10 m, a maioria dos atributos avaliados exibiram diferenças não significativas ($p > 0,05$) com exceção de RP, um, Corg (Tabela 3), para RP, as áreas sob SPD apresentaram maiores valores com 1,48 e 1,40 MPa para SPD 4 e 11, respectivamente, quando comparado com a área de vegetação nativa (tabela 3).

Enquanto isso as demais áreas apresentaram valores de RP, na camada de 0,00 – 0,10 m inferiores a 1 MPa, porém, os resultados de RP nesta camada variaram mais em função da umidade do solo em relação aos demais manejos, pois, houve correlação significativa entre RP e U de -0,65 (Tabela 4).

Tabela 3 - Valores médios de atributos físicos do solo e de carbono em diferentes profundidades do solo e sistemas de produção agrícola no Cerrado

	RP	U	Corg	PA	Ds	Pt	Ma	Mi	DMP
0,00 – 0,10 m									
SPD 4	1,48 a	0,12 b	19,07 b	0,34 a	1,22 a	0,47 a	0,12 a	0,34 a	1,60 a
ILP 5 MAV	0,72 bcd	0,17 ab	18,50 b	0,34 a	1,15 a	0,52 a	0,16 a	0,36 a	1,81 a
ILP 5 MUL	0,75 abcd	0,18 a	20,53 b	0,32 a	1,26 a	0,51 a	0,14 a	0,37 a	1,52 a
SPD 11	1,40 ab	0,12 b	19,68 b	0,38 a	1,11 a	0,51 a	0,14 a	0,36 a	1,59 a
ILP 10 MAV	0,88 abc	0,16 ab	19,26 b	0,33 a	1,24 a	0,49 a	0,14 a	0,35 a	1,74 a
ILP 10 MUL	0,65 cd	0,16 ab	18,77 b	0,32 a	1,28 a	0,49 a	0,13 a	0,36 a	1,57 a
Veg. Nativa	0,02 d	0,19 a	28,73 a	0,29 a	1,29 a	0,49 a	0,13 a	0,35 a	1,55 a
CV (%)	37,43	14,41	14,58	17,39	7,43	10,47	26,46	20,17	11,33
0,10 – 0,20 m									
SPD 4	2,25 b	0,14 bc	17,87 a	0,34 ab	1,34 a	0,48 a	0,32 a	0,15 a	1,76 a
ILP 5 MAV	3,56 a	0,16 abc	18,09 a	0,28 b	1,42 a	0,44 a	0,28 a	0,16 a	1,71 a
ILP 5 MUL	2,91 ab	0,17 ab	17,57 a	0,29 ab	1,32 a	0,46 a	0,30 a	0,16 a	1,58 a
SPD 11	3,19 ab	0,12 c	17,55 a	0,38 a	1,39 a	0,51 a	0,33 a	0,18 a	1,55 a
ILP 10 MAV	3,65 a	0,16 ab	16,96 a	0,36 ab	1,35 a	0,52 a	0,30 a	0,22 a	1,70 a
ILP 10 MUL	2,89 ab	0,18 a	17,22 a	0,26 b	1,40 a	0,45 a	0,27 a	0,17 a	1,47 a
Veg. Nativa	0,23 c	0,15 bc	19,66 a	0,36 ab	1,23 a	0,51 a	0,36 a	0,14 a	1,38 a
CV (%)	18,09	9,37	10,25	14,75	7,71	9,94	15,88	29,36	15,00
0,20 – 0,40 m									
SPD 4	2,28 b	0,11 c	18,00 a	0,39 ab	1,25 bc	0,50 ab	0,33 ab	0,17 a	1,50 a
ILP 5 MAV	3,68 a	0,14 abc	15,34 a	0,21 b	1,47 a	0,35 b	0,23 b	0,12 a	1,80 a
ILP 5 MUL	3,10 ab	0,16 abc	14,57 a	0,40 a	1,20 c	0,56 a	0,36 a	0,19 a	1,52 a
SPD 11	3,45 a	0,12 bc	15,49 a	0,39 ab	1,25 bc	0,51 ab	0,33 ab	0,17 a	1,42 a
ILP 10 MAV	3,89 a	0,18 a	16,80 a	0,37 ab	1,40 ab	0,56 a	0,35 ab	0,21 a1	1,61 a
ILP 10 MUL	4,06 a	0,17 ab	14,99 a	0,32 ab	1,39 abc	0,49 ab	0,32 ab	0,17 a	1,41 a
Veg. Nativa	0,69 c	0,14 abc	16,07 a	0,36 ab	1,36 abc	0,51 ab	0,33 ab	0,18 a	1,41 a
CV (%)	4,10	14,93	10,46	22,68	6,10	13,40	16,85	29,54	14,62
0,40 – 0,60 m									
SPD 4	-	0,11 ab	18,00 a	0,34 a	1,25 ab	0,45 ab	0,30 bc	0,14 ab	1,32 a
ILP 5 MAV	-	0,15 a	15,34 a	0,35 a	1,33 a	0,49 ab	0,34 abc	0,14 ab	1,51 a
ILP 5 MUL	-	0,13 ab	14,57 a	0,34 a	1,13 b	0,50 a	0,41 a	0,09 c	1,37 a
SPD 11	-	0,10 b	15,49 a	0,27 a	1,26 ab	0,38 b	0,25 c	0,13 abc	1,21 a
ILP 10 MAV	-	0,15 ab	16,80 a	0,34 a	1,37 a	0,49 a	0,32 abc	0,17 a	1,41 a
ILP 10 MUL	-	0,12 ab	14,99 a	0,36 a	1,25 ab	0,48 ab	0,37 abc	0,11 bc	1,22 a
Veg. Nativa	-	0,13 ab	16,80 a	0,35 a	1,42 a	0,48 ab	0,31 abc	0,17 ab	1,51 a
CV (%)	-	14,76	10,46	14,88	6,13	9,83	13,70	16,72	13,47

SPD 4: sistema de plantio direto por 4 anos de instalação; SPD 11: sistema de plantio direto por 11 anos; ILP 5 MAV: Integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mavuno ; ILP 5 MUL: Integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mulato; ILP 10 MAV: Integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mavuno; ILP 10 MUL: Integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mulato; Veg. Nativa: Vegetação nativa; CV: Coeficiente de variação; RP: resistência do solo à penetração (MPa); U: umidade gravimétrica (g Kg⁻¹); Corg: Carbono orgânico (g Kg⁻¹); PA: Porosidade de aeração (m³m⁻³); Ds: Densidade do solo (Mg m⁻³); Pt: Porosidade total (m³m⁻³); Ma: macroporosidade (m³m⁻³); Mi: microporosidade (m³m⁻³); DMP: Diâmetro médio ponderado (mm). Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para o teor de C na camada de 0,00 – 0,10 m, a área de vegetação nativa proporcionou maior valor médio de 28 g kg⁻¹ quando comparado com as áreas de SPD com 19 g kg⁻¹ e ILP com variação de 18 – 20 g kg⁻¹ (Tabela 3). Este resultado demonstrou a redução no teor de carbono do solo após a conversão de área sob vegetação nativa para uso agrícola, este efeito foi comprovado em diversos trabalhos (NUNES et al., 2021; SOARES et al., 2021; FERREIRA et al., 2018).

Na camada de 0,10 – 0,20 m, maiores valores de RP foram encontrados nas áreas de ILP com *Urochloa híbrida cv. Mavuno* quando comparado com a área sob vegetação nativa com valores de 3,56 e 3,65 MPa para ILP 5 Mav e ILP 10 Mav, respectivamente (Tabela 3). No entanto estes valores ainda estão abaixo do nível crítico de RP que segundo Imhoff et al. (2000) para sistemas de ILP avaliados em condições de solo semelhante deste trabalho e com 29 anos de ILP, o valor crítico de RP é de 2,5 MPa.

Para umidade do solo na camada de 0,10 – 0,20 m, os valores mais elevados foram, geralmente, nas áreas de ILP quando comparado com as áreas de SPD e vegetação nativa, cujo efeito corresponde a presença permanente das forrageiras durante o ciclo, preservando a umidade do solo. Assim sistemas de ILP apresentam benefícios, como a criação de bioporos no solo promovendo maior distribuição de água no solo (BERTOLLO et al., 2021).

Para PA, em nenhum momento foi atingido o limite crítico de $< 0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (GRABLE; SIEMER, 1968). Na camada de 0,10 – 0,20 m, o maior valor médio foi detectado na área com SPD 11 com valor de $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, isto deve-se à menor umidade do solo nesta área e camada avaliada, cujos atributos apresentaram correlação de - 0,55 (Tabela 4). Na camada de 0,20 – 0,40 m, foi possível observar mais distinções entre os sistemas de produção quando avaliados os demais atributos.

A maior Ds foi encontrada na área de ILP 5 Mav com valor médio de $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$ quando comparada com a área de ILP 5 Mul com $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 4). Na área de ILP 5 Mav, o valor de Ds pode ser considerado alto para o tipo de solo de acordo com Tavanti et al., (2019), o qual diz em seu estudo que Latossolos submetidos a sistemas integrados lavoura-pecuária devem ser manejados com no máximo de $1,54 \text{ Mg ha}^{-1}$ e isto reflete em outros parâmetros do solo, ou seja, a maior Ds refletiu em menor Pt, Ma e PA conforme a análise de correlação (Tabela 4).

O sistema ILP 5 com *Urochloa híbrida cv. Mavuno* foi o que menos favoreceu o solo na camada de 0,20 – 0,40 m. Para RP na camada 0,20 – 0,40 m, todas as áreas sob SPD e ILP apresentaram maiores valores quando comparado com a área de vegetação nativa, sendo que as áreas de SPD exibiram valores variando de 2 – 3 MPa, enquanto ILP de 3 – 4 MPa (Tabela 3).

Tabela 4 - Análise de correlação de parâmetros físicos do solo em diferentes profundidades do solo no Cerrado

	Pt	Ma	Mi	RP	U	DMP	PA	Corg
0,00-0,10 m								
Ds	-0,43*	0,23	-0,44*	-0,37	0,23	-0,14	-0,52	0,13
Pt	-	-0,23	0,87**	-0,11	0,13	-0,23	0,80**	-0,03
Ma		-	-0,68**	-0,12	-0,25	0,16	-0,05	-0,02
Mi			-	-0,02	0,22	-0,26	0,63**	-0,03
RP				-	-0,65**	-0,13	0,28	-0,51**
U					-	0,01	-0,46	0,34
DMP						-	-0,22	-0,19
DRES							-0,05	0,15
PA							-	-0,25
0,10-0,20 m								
Ds	-0,36	-0,63**	0,28	0,34	0,07	0,07	-0,33	0,33
Pt	-	0,53**	0,50**	-0,13	-0,20	0,11	0,92**	0,07
Ma		-	-0,46	-0,33	-0,37	-0,07	0,59	0,45*
Mi			-	0,20	0,17	0,19	0,36	0,39*
RP				-	0,15	0,35	-0,16	0,27
U					-	-0,05	-0,55**	0,06
DMP						-	0,11	0,26
PA							-	0,08
0,20-0,40 m								
Ds	-0,54**	-0,63**	-0,14	0,16	0,26	0,36	-0,59**	0,01
Pt	-	0,81**	0,70**	-0,7	-0,02	-0,31	0,94**	0,24
Ma		-	0,16	-0,12	-0,03	-0,39*	0,77**	-0,05
Mi			-	0,02	0,004	-0,04	0,66**	0,48*
RP				-	0,26	0,20	-0,16	-0,19
U					-	-0,01	-0,35	-0,33
DMP						-	-0,28	0,11
PA							-	0,34
0,40-0,60 m								
Ds	0,08	-0,39	0,84**	-	0,08	0,14	0,05	0,18
Pt	-	0,83**	0,05	-	0,40*	0,09	0,90**	0,12
Ma		-	-0,50**	-	0,33	-0,04	0,75**	-0,11
Mi			-	-	0,02	0,21	0,04	0,39*
U				-	-	0,29	-0,03	-0,16
DMP				-	-	-	-0,04	-0,28
PA				-	-	-	-	0,21

Ds: Densidade do solo (Mg m^{-3}); Pt: Porosidade total (m^3m^{-3}); Ma: macroporosidade (m^3m^{-3}); Mi: microporosidade (m^3m^{-3}); RP: resistência do solo à penetração (MPa); U: umidade gravimétrica (g Kg^{-1}); DMP: Diâmetro médio ponderado (mm); PA: Porosidade de aeração (m^3m^{-3}); DRES: diagnóstico rápido da estrutura do solo; Corg: Carbono orgânico (g Kg^{-1}). * significativo ($p<0,05$) ** significativo ($p<0,01$).

Quando avaliado o tempo de adoção dos sistemas, houve valores de 2 – 3 MPa nos manejos com histórico de implementação mais recente e de 3 – 4 MPa para os mais antigos (Tabela 3). Fundamentado nisso, houve um aumento da RP com a manutenção dos sistemas de 10 e 11 anos, porém, é possível que este efeito entre os sistemas altere com o decorrer dos anos de estabelecimento dos sistemas. De acordo com Altman et al., (2010) no período entre

10 – 20 anos, o SPD entra na fase de estabilização das propriedades do solo, porém, antes deste período, o solo encontra-se em constante adaptação e reestruturação.

Na camada de 0,40 – 0,60 m, maiores valores de Ds foram encontrados nas áreas de ILP5 Mav, ILP 10 Mav e vegetação nativa com valores de 1,33; 1,37 e 1,42 Mg m⁻³, respectivamente (Tabela 3). Estes valores refletiram em mais valores de microporosidade do solo com valor de correlação entre os dois atributos de 0,84 (Tabela 5).

Para Pt na camada de 0,40 – 0,60 m, maiores valores foram identificados no solo sob ILP 5 Mul e ILP 10 Mav com valores de 0,50 e 0,49 m³ m⁻³, respectivamente, e menor valor na área de SPD 11 com 0,38 m³ m⁻³ (Tabela 3). Reis et al. (2019) detectaram em seu estudo poros de formato complexo, como fissuras, os quais contribuíram em maior escala para os valores de porosidade nas camadas do solo de ILP do que SPD. Além disso, foi possível observar que na área de SPD 11 com menor Pt, os valores de umidade também foram menores, cujos atributos apresentaram correlação significativa (p<0,05) de 0,40 na profundidade de 0,40 – 0,60 m (Tabela 4).

Pela análise de componentes principais (ACP) foi possível relacionar os atributos avaliados nos diferentes ambientes de estudo (sistemas de produção). Na camada de 0,00 – 0,10 m, os atributos que mais explicaram a variância no componente principal 1 (CP1) foi a RP e a U com 25 e 22%, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Variância explicada (%) de atributos físicos do solo em diferentes profundidades e sistemas de produção agrícola no Cerrado

	0,00-0,10 m		0,10-0,20 m		0,20-0,40 m		0,40-0,60 m	
	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Ds	21,55	6,40	17,04	0,54	20,23	2,28	26,53	6,12
Ma	2,00	42,70	18,31	12,14	28,94	5,52	18,08	15,98
Mi	0,04	21,61	9,21	1,62	23,54	10,04	31,96	2,44
RP	25,61	6,29	22,46	2,08	5,27	20,62	-	-
U	22,41	11,72	3,96	58,89	0,24	46,54	1,42	38,11
DMP	6,53	11,25	8,78	24,54	20,07	0,29	4,01	33,43
Corg	2,18	0,005	20,21	0,15	1,66	14,67	18,87	3,90

Ds: Densidade do solo (Mg m⁻³); Ma: macroporosidade (m³m⁻³); Mi: microporosidade (m³m⁻³); RP: resistência do solo à penetração (MPa); U: umidade gravimétrica (g Kg⁻¹); DMP: Diâmetro médio ponderado (mm); Corg: Carbono orgânico (g Kg⁻¹). CP1 e CP2: componente principal 1 e 2.

Houve comportamento antagônico entre RP e U com maiores valores de RP nos ambientes sob SPD 4 e 11, indicando que os SPD tendem a apresentar maiores valores de RP na camada de 0,00 – 0,10 m do que os sistemas de ILP (Figura 6 A).

Na camada de 0,10 – 0,20 m, a RP e Corg apresentaram maior variância com 22 e 20 %, respectivamente (Tabela 6), sendo que a RP foi maior nas áreas de ILP com *Urochloa híbrida* cv. Mavuno indicam ambiente menos favorecido ao desenvolvimento de plantas comparado aos demais sistemas na camada de 0,10 – 0,20 m e isto pode ser reforçado pelos atributos Ds e Mi que também ficaram posicionados nas áreas de ILP de *Urochloa híbrida* cv. Mavuno (Figura 6 B).

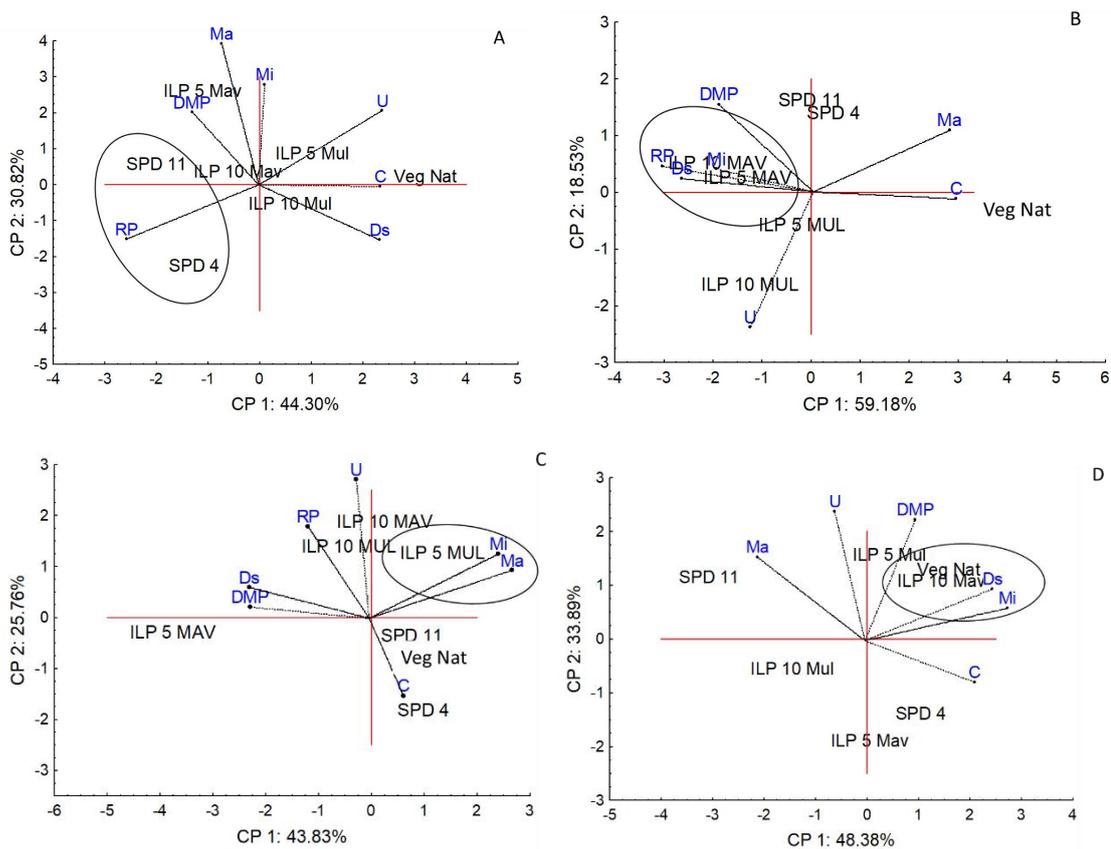


Figura 6 - Diagrama de dispersão biplot de escores dos componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2) de atributos físicos do solo, avaliados nas camadas do solo de 0,00-0,10 (A), 0,10-0,20 (B), 0,20-0,40 (C) e 0,40-0,60 m (D) em ambientes de produção agrícola. SPD 4: sistema de plantio direto por 4 anos de cultivo; SPD 11: sistema de plantio direto por 11 anos de cultivo; ILP 5 MAV: integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mavuno no ano de 2021; ILP 5 MUL: integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mulato no ano de 2021; ILP 10 MAV: integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mavuno no ano de 2021; ILP 10 MUL: Integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar *Urochloa híbrida* cv. Mulato no ano de 2021; Mata: Vegetação nativa.

Na camada de 0,20 – 0,40 m, a Ma e Mi explicaram 28 e 23%, respectivamente (Tabela 4), sendo que ambos foram mais significativos na área de ILP5 Mul. Este resultado indica que nessa área a dinâmica da água pode ser favorecida por apresentar tanto macro

quanto microporos respiráveis pela infiltração e retenção de água, respectivamente, ambos importantes para o ambiente solo planta.

Na camada 0,40 – 0,60 m, a Mi foi a principal variável com 31% da variância e foi mais significativa nas áreas de ILP10 Mav e Vegetação Nativa, indicando ambientes com solo na camada 0,40 – 0,60 m mais adensados (Tabela 6), cujo adensamento na área de vegetação nativa é devido a processos naturais ou pedogenéticos, enquanto na área de ILP, causa antrópica possivelmente pelo tráfego de máquinas durante o período de safra, visto que problemas de adensamento provocados por pisoteio animal são mais frequentes nas camadas mais superficiais do solo (BONETTI et al., 2021; CECAGNO et al., 2016).

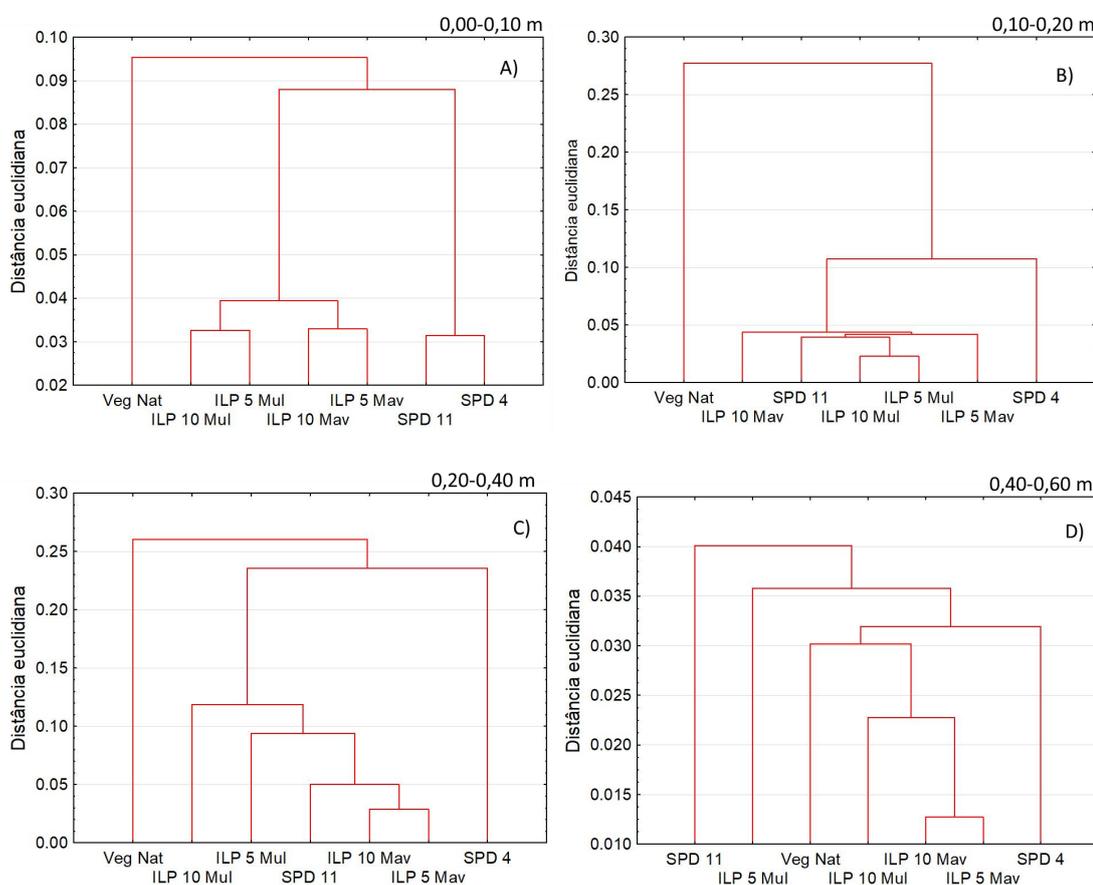


Figura 7 - Dendrograma de interrelação de sistemas de produção agrícola.

SPD 4: sistema de plantio direto por 4 anos de cultivo; SPD 11: sistema de plantio direto por 11 anos de cultivo; ILP 5 MAV: integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar Urochloa híbrida cv. Mavuno no ano de 2021; ILP 5 MUL: integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar Urochloa híbrida cv. Mulato no ano de 2021; ILP 10 MAV: Integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar Urochloa híbrida cv. Mavuno no ano de 2021; ILP 10 MUL: integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar Urochloa híbrida cv. Mulato no ano de 2021; Veg. Nativa: Vegetação nativa.

A análise de Cluster evidenciou similaridade entre sistemas de produção agrícola, (Figura 7 A), sendo que na camada de 0,00 – 0,10 m, foi possível observar maiores semelhanças entre os sistemas com menor e maior histórico de implantação, ou seja, ILP 10 Mul e ILP 5 Mul, ILP 10 Mav e ILP 5 Mav, SPD 11 e SPD 4. Enquanto estes sistemas apresentaram maiores diferenças (distância euclidiana) com os demais na camada 0,00 – 0,10 m.

Na camada 0,10 – 0,20 m, a área de vegetação nativa ainda apresentou maiores diferenças que os sistemas de produção (Figura 7 B). Além disso, foi possível observar similaridade entre os sistemas SPD 11 e ILP 5 e 10 Mul. De forma similar Favarato et al., (2016) não identificaram diferenças de propriedades físicas do solo em áreas de SPD e ILP com mais de 5 – 7 anos de instalação dos sistemas.

Na camada de 0,20 – 0,40 m, os sistemas mais semelhantes foram o ILP 10 Mav e ILP5 Mav, indicando poucas diferenças nos atributos físicos do solo em 10 anos de instalação deste sistema (Figura 7 C). Na camada 0,40 – 0,60 m, porém, já foi possível identificar mais similaridades dos sistemas de ILP 10 Mul, ILP 10 Mav e ILP5 Mav com a área de Vegetação Nativa (Figura 7 D), sendo importante frisar que nesta camada, a Vegetação Nativa apresentou sinais de adensamento do solo.

Quando avaliado o DRES os dados da ANAVA mostraram efeito significativo ($p < 0,05$) para a estrutura do solo entre a mata nativa e o ILP 5 Mul em relação ao SPD de recente implementação (4 anos), (Tabela 6). Notaris et al. (2021) observaram em seu estudo que a densidade do solo, a permeabilidade ao ar e a organização dos poros foram afetadas em certa medida pelo manejo de produção, afetando as camadas superiores do solo, independente do sistema cultivado, e quando esse solo se encontra desprotegidos há uma aceleração desta degradação.

De acordo com Ralisch et al. (2017), solos argilosos com nota 5 pelo método DRES apresentam totalidade de agregados com tamanho entre 1 – 4 cm, caracterizando uma condição estrutural desejável, uma vez que agregados com este limite de tamanho, associado com aspecto grumoso, alta atividade biológica e porosidade visível, permite ao solo exercer adequadamente suas funções.

Diante disso, foi possível observar que somente dois tratamentos promoveram notas abaixo de 5, sendo o solo sub cultivo de SPD 4 anos e ILP com *Urochloa híbrida cv. Mavuno* 10 anos com notas DRES de 4,52 e 4,95 respectivamente, indicando solo com menos de 50% dos agregados com tamanho entre 1 – 4 cm, o que pode comprometer funções do solo como infiltração e retenção de água.

Possivelmente devido à pouca cobertura vegetal do SPD 4 anos e a pouca capacidade de cobertura vegetal da *Urochloa híbrida cv. Mavuno*, a qual sua produção de massa seca é afetada em

longos períodos de estiagem, impede a forrageira de exercer uma proteção física ao solo mais eficiente (VIEIRA et al., 2020).

Tabela 6 - Nota de qualidade estrutural do solo avaliado pelo método “Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo” - DRES em solo com diferentes sistemas de cultivo no Cerrado

Sistemas	DRES
SPD 4	4,52 b
ILP 5 MAV	5,62 ab
ILP 5 MUL	5,92 a
SPD 11	5,82 ab
ILP 10 MAV	4,95 ab
ILP 10 MUL	5,55 ab
Veg. Nativa	6,00 a
CV(%)	10,75

SPD 4: sistema de plantio direto por 4 anos de cultivo; SPD 11: sistema de plantio direto por 11 anos de cultivo; ILP 5 MAV: integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar *Urochloa* híbrida cv. Mavuno no ano de 2021; ILP 5 MUL: integração lavoura pecuária de 5 anos com a cultivar *Urochloa* híbrida cv. Mulato no ano de 2021; ILP 10 MAV: integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar *Urochloa* híbrida cv. Mavuno no ano de 2021; ILP 10 MUL: integração lavoura pecuária de 10 anos com a cultivar *Urochloa* híbrida cv. Mulato no ano de 2021; Veg. Nativa: Vegetação nativa.

Os demais sistemas promoveram melhor estrutura de agregação do solo, com destaque para o ILP com *Urochloa* híbrida cv. Mulato de 5 anos com nota DRES de 5,92, provavelmente por essa espécie apresentar características de se desenvolver com facilidade em regiões subtropicais, com crescimento radicular e aéreo intenso (HORROCKS et al., 2019).

4 CONCLUSÕES

A integração lavoura pecuária de 5 anos com *Urochloa* híbrida cv. Mulato foi o sistema que apresentou melhor qualidade física do solo.

Valores menores de resistência do solo à penetração são encontrados nos manejos com histórico de implementações mais recentes.

Há similaridade entre sistemas de produção agrícola para os sistemas com menor e maior histórico de implantação, na camada superficial do solo.

REFERÊNCIAS

ALTMANN, N. **Plantio Direto no Cerrado: 25 anos acreditando no sistema**. Passo Fundo: Ed. Aldeia Norte, 2010. 568p.

BACQ-LABREUIL, A.; CRAWFORD, J.; MOONEY, S. J.; NEAL, A. L.; AKKARI, E.; AULIFFE, C. M. C.; ZHANG, X.; REDMILE-GORDON, M.; RITZA, K. Effects of cropping systems upon the three-dimensional architecture of soil systems are modulated by texture. **Geoderma**, v. 332, n. 1, p. 73-83, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.002

BEATA, E. M. **Fracionamento de agregados procedimento para uma estimativa compartimentada do sequestro de carbono no solo**. Ministério da agricultura pecuária e abastecimento, Brasília, 2004. (MAPA. Comunicado Técnico, 22)

BELANGER, E.; LUCOTTE, M.; MOINGT, M.; PAQUET, S.; OESTREICHER, J.; ROZON, C. Altered nature of terrestrial organic matter transferred to aquatic systems following deforestation in the Amazon. **Applied Geochemistry**, v. 87, n. 1, p. 136-145, 2017. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2017.10.016

BERTOLLO, A. M.; MORAES, M. T.; FRANCHINI, J. C.; SOLTANGHEISI, A.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; LEVIEN, R.; DEBIASI, H. Precrops alleviate soil physical limitations for soybean root growth in an Oxisol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 206, n. 1, e104820, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104820

BIANCO-CANQUI, H.; JASSA, P. J. Do Grass and Legume Cover Crops Improve Soil Properties in the Long Term? **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 4, p. 1181-1187, 2019. DOI: 10.2136/sssaj2019.02.0055

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; BREDEMEIER, C.; MORAES, M. T.; TORMENA, C. A.; GUBIANI, P. I. Physical recovery of an Oxisol under an integrated crop-livestock system in southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2021. DOI: 10.1080/03650340.2021.2013471

BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; MORAES, M. T. Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, n. 1, p. 280-291, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2018.11.003

BONINI, I.; MARIMON-JUNIOR, B. H.; MATRICARDI, E.; PHILIPS, O.; PETTER, F.; OLIVEIRA, B.; MARIMON, B. S. Collapse of ecosystem carbon stocks due to forest conversion to soybean plantations at the Amazon-Cerrado transition. **Forest Ecology and Management**, v. 414, n. 1, p. 64-73, 2018. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.01.038.

CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FREITAS, D. A. F.; MINCATO, R. L.; FERREIRA, M. M. métodos de indexação de indicadores na avaliação da qualidade do solo em relação à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 589-597, abr. 2015. DOI:10.1590/01000683rbc20140363

CECAGNO, D.; COSTA, S. E. V. G. A.; ANGHINONIA, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINSA, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI, F.; FINKA, J. R.; CARVALHO, P. C. F. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 54 – 62, 2016. DOI: 10.1016/j.still.2015.10.005

FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, C. M.; GUARCONI, R. C.; BALBINO, J. M. S. Crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico. **Solos e Nutrição de Plantas**, v. 75, n. 4, p. 497-506, 2016. DOI: 10.1590/1678-4499.549

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; TIVET, F.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P.; ROMANIW, J. Macroaggregation and soil organic carbon restoration in a highly weathered Brazilian Oxisol after two decades under no-till. **Science of the Total Environment**, v. 621, n. 1, p. 1559-1567, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.072

FERREIRA, D. F. **Estatística Multivariada**. Lavras: UFLA, 2008.

FERREIRA, D. F. SISVAR, a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: 10.28951/rbb.v37i4.450

GALDOS, M. V.; PIRES, L. F.; COOPER, M.; CALONEGO, J. C. ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v. 337, n. 1, p. 1126-1135, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.11.031

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 32, n. 2, p. 180-186, 1968. DOI: 10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. **Análise Multivariada de Dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593p.

HORROCKS, C. A.; ARANGO, J.; AREVALO, A.; NUNEZ, J.; CARDOSO, J. A.; DUNGAIT, J. A. J. Smart forage selection could significantly improve soil health in the tropics. **Science of the Total Environment**, v. 688, n. 1, p. 609-621, 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.152

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Applications of the resistance curve in the control of the physical quality of soils under grass. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000. DOI: 10.1590/S0100-204X2000000700025

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 767p.

JONGMAN, R. H. G.; BRAAK, C. J. F.; TONGEREN, V. O. F. R. **Data Analysis in Community and Landscape Ecology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 299p.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, n. 1, p. 178-200, 1958.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (Ed.) **Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling**. Wisconsin, USA: American Society Agronomy, 1965. Cap. 39, p. 499-510.

KLEIN, V.A. **Física do Solo**. 2. ed. Passo Fundo: Editora UPF, 2012. 240p.

LOPES SOBRINHO, O. P.; SANTOS, L. N. S.; SANTOS, G. O.; CUNHA, F. N.; SOARES, F. A. L.; TEIXEIRA, M. B. Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. 2, p. 19-33, 2020. DOI: 0.5380/abclima.v27i0.68692

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 295p.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. D.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 584-590, jan. 2012. DOI: 10.1590 / S1415-43662012000500015

MOTA, J. C. A.; ALENCAR, T. L.; ASSIS JUNIOR, R. N. Alterações físicas de um cambissolo cultivado com bananeira irrigada na Chapada do Apodi, Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1015-1024, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc2014001

NOTARIS, C.; JENSEN, J. L.; OLESEN, J. E.; SILVA, T. S.; RASMUSSEN, J. PANAGEA, L. RUBÆK, G. H. Long-term soil quality effects of soil and crop management in organic and conventional arable cropping systems. **Geoderma**, v. 403, n. 1, e115383, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115383

NUNES, M. R.; VAZ, C. M. P.; PESSOA, T. N.; JOSÉ E. DENARDIN, J. E.; KARLEN, D. L.; GIAROL, N. F. B.; LIBARDI, P. L. Inherent and dynamic effects on the structural stability of Brazilian Oxisols. **Geoderma Regional**, v. 27, n. 1, e00426, 2021. DOI: 10.1016/j.geodrs.2021.e00426

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; ROSA, J. A.; COOPER, M.; HECK, R. J.; PASSONI, S.; ROQUE, W. L. Soil structure changes induced by tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 165, n. 1, p. 66-79, 2017. DOI: 10.1016/j.still.2016.07.010

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. S.; BONA, F. D. **Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2017. 62p.

REIS, A. M. H.; ARMINDO, R.; PIRES, L. Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 194, pp. 104294, 2019. DOI: 10.1016 / j.still.2019.104294

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018. 355p.

SILVA, M. F.; FERNANDES, M. M. H.; FERNANDES, C.; SILVA, A. M. R.; FERRAUDO, A. S.; COELHO, A. P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, v. 209, n. 1, e104924, 2021. DOI: 10.1016/j.still.2020.104924

SIMS, J. R.; HABY, V. A. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. **Soil Science**, v. 112, n. 2, p. 137-141, 1971. DOI: 10.1097/00010694-197108000-00007

SOARES, M. D. R.; SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, R. B.; ESTEBAN, D. A. A.; NORONHA, R. L.; GOMES, M. G. S.; DA CUNHA, J. M. Land-use change and its impact on physical and mechanical properties of Archaeological Black Earth in the Amazon rainforest. **Catena**, v. 202, n. 1, e105266, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105266

TAVANTI, R. F. R.; FREDDI, O. S.; MARCHIORO, V.; TAVANTI, T. R.; GALINDO, F. S.; WRUCK, F. J.; SHIRATSUCHI, L.; BREDA, C. C. Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 19, n. 1, e00232, 2019. DOI: 10.1016/j.geodrs. 2019.e00232

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

VIEIRA, M. C.; RODRIGUES, J. A.; ABREU, J. G.; SANTANA, A. P. L.; BARBOSA JUNIOR, J. B. Capim-mavuno em diferentes períodos de diferimento. **Nutri-time**, v. 17, n. 3, p. 8722-8729, 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de sistemas de integração lavoura pecuária (ILP), em comparação ao cultivo de plantio direto (SPD), possivelmente melhoraram a qualidade física do solo devido à maior diversidade de raízes e exploração do solo em condições de Cerrado. Os sistemas de ILP podem estimular uma maior drenagem em relação ao SPD, no entanto o SPD recente permitiu um teor maior de umidade na camada de 0,10 – 0,20 m devido a pulverização de agregados nas camadas superiores, diminuindo sua porção de microporosa nessa camada (0,00 – 0,10 m). Ambos os sistemas permitem ao solo se manter friável mesmo sobre resistência a penetração crítica.

Para o capítulo II com mais sistemas a serem avaliados, percebeu-se que a forrageira no sistema ILP influenciou na avaliação, possivelmente pela maior adaptação edafoclimática ao Cerrado, maior capacidade de cobertura do solo. O cultivo mais recente apresentou resultados melhores em relação aos sistemas mais antigos de ILP, no entanto até mesmos os sistemas mais antigos desse estudo, estão iniciando a fase de estabilização (10 anos).

Todos os sistemas se aproximam em certa forma a vegetação nativa, no entanto é nítido o decréscimo de valores dos atributos físicos do solo quando se compara a serrapilheira aos sistemas de cultivo. Este estudo tem muito a ser observado, pois até mesmo os sistemas mais antigos, recém entraram na fase de estabilização, possibilitando o desenvolvimento de trabalhos futuros nesses sistemas de cultivo agrícola